

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Marcos Fellipe Santana Oliveira Machado

**Tutorial para Aplicação do Software *OpenDSS* na Análise de Redes de
Distribuição de Energia Elétrica**

São Luís – MA

2017

Marcos Fellipe Santana Oliveira Machado

**Tutorial para Aplicação do Software *OpenDSS* na Análise de Redes de
Distribuição de Energia Elétrica**

Monografia de conclusão de curso
apresentada ao Curso de Engenharia
Elétrica do Departamento de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal do
Maranhão, como requisito parcial à
conclusão do curso

Orientador: Prof. Anselmo B.Rodrigues, D.Sc.

Co-orientadora: Prof^a. Maria da Guia da Silva, Ph.D.

São Luís-MA

2017

MARCOS FELLIPE SANTANA OLIVEIRA MACHADO

**TUTORIAL PARA APLICAÇÃO DO SOFTWARE OPENDSS NA ANÁLISE DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada ao curso de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Maranhão para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 21 / 07 / 2017

BANCA EXAMINADORA


Prof. Anselmo Barbosa Rodrigues, D.Sc.
DEE/UFMA


Prof.^a Maria da Guia da Silva, Ph.D.
DEE/UFMA


Prof. Rodrigo José Albuquerque Frazão, D.Sc.
PPGEE/UFMA


Prof. Raimundo Nonato Diniz Costa Filho, M.Sc.
BCT/UFMA

RESUMO

As distribuidoras, que são responsáveis pela manutenção da qualidade da distribuição de energia elétrica, precisam estar sempre usando os softwares que fornecem suporte necessário para atender as necessidades em desenvolvimento no país, como é a geração distribuída. Os softwares usados precisam estar preparados para analisar diferentes aspectos da rede de distribuição de energia elétrica, oferecendo ao usuário diferentes ferramentas e alternativas de análise e oferecendo a ele um controle sobre o software. O *Open Distribution System Simulator* (“OpenDSS”) foi disponibilizado pelo *Electric Power Research Institute* (“EPRI”) com o objetivo de estimular a realização de estudos técnicos associados com redes elétricas inteligentes de forma padronizada. O objetivo desta monografia é desenvolver um tutorial para a utilização do software *OpenDSS*. O *OpenDSS* é um software de código aberto que é usado para realizar diversos estudos e análises em redes de distribuição, por exemplo: fluxo de potência, curto-circuito, harmônicos, etc. Visando fornecer subsídios para a utilização do *OpenDSS*, foi apresentada inicialmente uma introdução sobre redes de distribuição. Em seguida, realizou-se uma introdução sobre os métodos usados pelo *OpenDSS* na análise de redes de distribuição. Finalmente, a aplicação deste programa foi demonstrada em um alimentador-teste do Cigré.

Palavras-chave: Redes de Distribuição; *OpenDSS*; Simulação; Fluxo de Potência; Curto-Circuito.

ABSTRACT

Distribution companies, who are responsible for maintaining the quality of electricity distribution, must always be using the software that provides the necessary support to meet the developing needs in the country, such as distributed generation. The software used must be prepared to analyze different aspects of the electricity distribution network, offering the user different tools and analysis alternatives and giving him control over the software. The Open Distribution System Simulator ("OpenDSS") was made available by the Electric Power Research Institute ("EPRI") in order to stimulate technical studies by associated with intelligent electrical networks in standardized way. The main aim of this monograph is to develop a tutorial for the use of OpenDSS software. OpenDSS is an open source software that is used to carry out various studies and analyzes in distribution networks, for example: power flow, short-circuit, harmonics, etc. Aiming to deliver support for the OpenDSS utilization, it was firstly presented an introduction on power distribution networks. Secondly, it was carried out an explanation on the methods used by the OpenDSS in the distribution network analysis. Finally, the application of the OpenDSS was demonstrated in a Cigré test feeder.

Keywords: Distribution Networks; OpenDSS; Simulation; Power Flow; Short Circuit.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pois sem ele nada é possível, em momentos que fraquejei ele estava lá para me dar forças e continuar em frente. Para ele minha vida e meu esforço são dedicados.

Agradeço também aos meus pais, Marcos Antônio e Rosinete, pois sou conhecedor de todo o suor que eles tiveram para que um dia eu pudesse ter a possibilidade de realizar este trabalho. Sei que todos os seus dias, desde o dia em que nasci, são dedicados ao meu bem-estar, minha segurança e paz.

Agradeço por todo apoio oferecido pelo meu orientador, professor Anselmo Barbosa e minha co-orientadora, professora Maria da Guia. Todo o tempo dedicado à me ensinar a melhor maneira de desenvolver esta monografia, bem como todas as pesquisas realizadas e disponibilização de material para estudo.

Em seguida agradeço aos meus irmãos, João Marcos e Marcos Gabriel, sem eles nada disso seria possível; todo apoio e motivação foram essenciais para que eu chegasse até este momento. Noites e noites sem dormir, de pesquisas, formatações e eles sempre comigo mesmo que para oferecer uma simples companhia, alguém no meio da noite para conversar.

Agradeço a minha namorada, Beatriz, pela força dada e pelo incentivo no decorrer da preparação da monografia e em todos os dias da minha vida, por toda a companhia nestes 6 anos que tenho estado ao lado dela.

Aos meus amigos, Zarley e Tarcísio, por serem fiéis companheiros durante toda minha graduação, pela ajuda com este trabalho, por todos os momentos que precisei de alguém para conversar. Pessoas que a gente leva para a vida.

Entre outras várias pessoas que ofereceram qualquer tipo de contribuição na minha graduação ou no decorrer da redação da monografia.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

(Ayrton Senna)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais Verbos.....	47
Tabela 2: Delimitadores da linguagem de programação do OpenDSS	48
Tabela 3: Dados da geometria das linhas aéreas do sistema-teste	105
Tabela 4: Parâmetros dos condutores do sistema-teste	105
Tabela 5: Conexões e parâmetros das linhas da seção trifásica do sistema-teste	106
Tabela 6: Conexões e parâmetros das linhas da seção monofásica do sistema-teste	106
Tabela 7: Parâmetros das cargas da seção trifásica.....	107
Tabela 8: Parâmetros das cargas da seção monofásica.....	107
Tabela 9: Parâmetros dos transformadores do sistema-teste	109
Tabela 10: Parâmetros do sistema de distribuição em alta tensão do sistema-teste	110
Tabela 11: Correntes de falta trifásicas e fator X/R	123
Tabela 12: Correntes e tensões para falta fase-terra	123
Tabela 13: Correntes e tensões para faltas do tipo fase-fase adjacente.....	125
Tabela 14: Resultados de fluxo de potência para o sistema-teste	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Arranjos típicos de redes de distribuição de alta tensão	19
Figura 2: Barra simples – Um circuito de suprimento.....	21
Figura 3: Barra simples – Dois circuitos de suprimento	21
Figura 4: Barra dupla com dois circuitos de suprimento – saída dos alimentadores primários.....	22
Figura 5: Barra dupla com disjuntor de transferência.....	24
Figura 6: Subestação com barra principal e barra de transferência	25
Figura 7: Diagrama da configuração primário radial.....	27
Figura 8: Diagrama unifilar da configuração primário seletivo com a operação das chaves em caso de detecção de falta	27
Figura 9: Diagrama unifilar da configuração de uma rede subterrânea com o primário operando em malha aberta	28
Figura 10: Diagrama unifilar da configuração de rede spot network	29
Figura 11: Diagrama unifilar da configuração de rede spot network com a representação das correntes de defeito	29
Figura 12: Evolução de rede de baixa tensão	31
Figura 13: Rede secundária reticulada.....	31
Figura 14: Alimentador com fases desequilibradas modelado para análise de curto-circuito.....	33
Figura 15: Interface do software CYMDIST.....	35
Figura 16: Interface do software WindMil	36
Figura 17: Interface do software OpenDSS.....	37
Figura 18: Interface do software GridLAB-D™	38
Figura 19: Estrutura do software OpenDSS	40
Figura 20: Barra com N nós	41
Figura 21: Terminal com N conectores	42
Figura 22: Elemento de transporte de energia com dois terminais, o primeiro com N conectores e o segundo com M conectores.....	42
Figura 23: Elemento de conversão de energia.....	43
Figura 24: Interface do OpenDSS	45
Figura 25: Exemplo de linha de comando com verbo interagindo.....	47
Figura 26: Exemplo de linha de comando sem interação com o verbo	47

Figura 27: Formato de nome do elemento	48
Figura 28: Formato para acessar propriedade de elemento	48
Figura 29: Formato para acessar múltiplos parâmetros de um elemento	49
Figura 30: Formato padrão para especificação de parâmetros	49
Figura 31: Formato para tornar as linhas de comando como comentários	49
Figura 32: Formato para tornar múltiplas linhas de comando como comentários	50
Figura 33: Formato para o caso com mais de uma linha para adicionar parâmetros	50
Figura 34: Formato para o caso em que o OpenDSS acusará um erro porque as barras 1 e 2 não estão na primeira linha	50
Figura 35: Formato para acessar arquivo externo .csv	51
Figura 36: Modelo de segmento de linha trifásica	55
Figura 37: Modelo de segmento de linha modificado	59
Figura 38: Modelo aproximado de segmento de linha.....	63
Figura 39: Conexão delta-estrela aterrado com as tensões demonstradas	63
Figura 40: Conexão delta-estrela aterrado com as correntes demonstradas.....	69
Figura 41: Conexão estrela não aterrada-delta.....	71
Figura 42: Diagrama fasorial de correntes de sequência positiva	71
Figura 43: Conexão estrela aterrado-estrela aterrado.....	73
Figura 44: Conexão do tipo Delta-Delta	75
Figura 45: Configuração estrela em aberto-delta em aberto	75
Figura 46: Carga conectada em estrela	77
Figura 47: Carga conectada em delta	79
Figura 48: Banco de capacitores trifásicos conectados em estrela.....	82
Figura 49: Banco de capacitores trifásicos conectados em delta.....	83
Figura 50: Impedância mútua entre duas fases	85
Figura 51: Solução padrão de fluxo de potência	86
Figura 52: Fluxograma do Método método Zbus.....	88
Figura 53: Cadastro de uma falta trifásica.....	93
Figura 54: Exemplo de uso da interface text para criação de elemento	95
Figura 55: Exemplo de uso da Circuit para escolher um elemento dentro do circuito	96
Figura 56: Exemplo de uso da Circuit para alterar propriedades de elemento dentro do circuito.....	96

Figura 57: Exemplos de uso da Circuit para armazenar os valores de tensão e nomes das barra	96
Figura 58: Exemplo de uso da Solve para realizar a solução do circuito	96
Figura 59: Relatório das tensões L-L obtidas no circuito através do menu Show	99
Figura 60: Relatório das correntes por fase nos elemento do circuito obtido através do menu Export	100
Figura 61: Relatório das correntes por fase no elemento Line.LINHA2 através da aba Visualize	101
Figura 62: Comandos utilizados para obtenção do gráfico com perfil de tensão	101
Figura 63: Topologia da seção trifásica do sistema-teste	103
Figura 64: Topologia da seção monofásica do sistema-teste	104
Figura 65: Geometria das linhas aéreas do sistema-teste	105
Figura 66: Cadastro de um tipo de condutor	108
Figura 67: Cadastro da geometria da seção trifásica	108
Figura 68: Cadastro de um linha trifásica	109
Figura 69: Cadastro do transformador da subestação	109
Figura 70: Cadastro do sistema de distribuição em alta tensão	110
Figura 71: Cadastro de um carga trifásica	111
Figura 72: Cadastro dos medidores na saída da subestação	111
Figura 73: Criando vetores para armazenar os valores das distâncias por fase	112
Figura 74: Criando vetores para armazenar os valores das tensões por fase	112
Figura 75: Cadastro do elemento capacitor	113
Figura 76: Criando vetores para armazenar os valores das distâncias das barras do alimentador 1 para a subestação	113
Figura 77: Criando vetores para armazenar os valores das tensões nas barras do alimentador 1	113
Figura 78: Comandos utilizados para plotagem dos gráficos	114
Figura 79: Nível de tensão no Alimentador 01 – Operação Normal	114
Figura 80: Nível de tensão no Alimentador 01 – Após a inserção dos bancos de capacitores	115
Figura 81: Nível de tensão no Alimentador 02 – Operação Normal	116
Figura 82: Cadastrando uma GD para o Alimentador 01	116
Figura 83: Nível de tensão no Alimentador 01 – Operação Normal	117
Figura 84: Nível de tensão no Alimentador 01 – Após a inserção da GD	117

Figura 85: Potência ativa e reativa na saída da SE para os casos com GD e sem GD	118
Figura 86: Castrando o laço para aumentar os valores das cargas em 45%	119
Figura 87: Nível de tensão no Alimentador 01 – Operação Normal	119
Figura 88: Nível de tensão no Alimentador 01 – Após o aumento de 45% da carga	120
Figura 89: Nível de tensão no Alimentador 02 – Operação Normal	120
Figura 90: Nível de tensão no Alimentador 02 – Após o aumento de 45% da carga	121
Figura 91: Comando utilizados para solução do circuito no modo FaultStudy	122
Figura 92: Cadastro de objeto de falta	126
Figura 93: Falta trifásica aplicada nas barras 04 e 08 do Alimentador 01	127
Figura 94: Afundamento de tensão para falta do tipo fase-terra	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Cabo de Alumínio
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
COM	<i>Component Object Model</i>
DLL	<i>Dynamic-link Library</i>
DSS	<i>Distribution System Simulator</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
GD	Geração Distribuída
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MS	<i>Microsoft</i>
NA	Normalmente Aberta
NF	Normalmente Fechada
NP	<i>Network Protector</i>
OpenDSS	<i>Open Distribution System Simulator</i>
PC	<i>Power Conversion</i>
PD	<i>Power Delivery</i>
PLPT	Programa Luz Para Todos
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SE	Subestação
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	18
1.2. REDES DE DISTRIBUIÇÃO	19
1.2.1. Redes de distribuição de alta tensão	19
1.2.1.1. Arranjos	19
1.2.1.2. Subestações de distribuição	20
1.2.2. Redes de distribuição de média-tensão	25
1.2.2.1. Redes aéreas – Primário radial	26
1.2.2.2. Redes Aéreas – Primário Seletivo	27
1.2.2.3. Redes subterrâneas - Primário operando em malha aberta	28
1.2.2.4. Redes subterrâneas – <i>Spot network</i>	28
1.2.2.5. Estações transformadoras	30
1.2.3. Redes de distribuição de baixa-tensão	30
1.2.3.1. Rede secundária aérea	30
1.2.3.2. Rede reticulada	31
1.3. ESTUDOS TÍPICOS REALIZADOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	32
1.3.1. Fluxo de potência	32
1.3.2. Estudo de curto-circuito	32
1.3.2.1. Tipos de curto-circuito	33
1.4. SOFTWARES USADOS NA ANÁLISE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO	
33	
1.4.1. Softwares comerciais usados na análise de redes de distribuição	34
1.4.1.1. Cymdist	34
1.4.1.2. Milsoft Engineering Analysis(EA)	35

1.4.2.	Softwares de código aberto	36
1.4.2.1.	<i>OpenDSS</i>	36
1.4.2.2.	GridLAB-D™	38
1.5.	INTRODUÇÃO SOBRE O <i>OPENDSS</i>	39
1.5.1.	Histórico do software <i>OpenDSS</i>	39
1.5.2.	Estrutura do software <i>OpenDSS</i>	40
1.5.3.	Modelos Básicos do <i>OpenDSS</i>	41
1.5.3.1.	Barra.....	41
1.5.3.2.	Terminal.....	41
1.5.3.3.	Elementos de Transporte de Energia (PD).....	42
1.5.3.4.	Elementos de Conversão de Energia	43
1.5.3.5.	Elementos de Suporte	43
1.5.4.	O <i>OpenDSS</i> Standalone e sua Interface	44
1.5.4.1.	Utilizando a <i>GUI</i> do <i>OpenDSS</i>	45
1.5.5.	A linguagem de programação do <i>OpenDSS</i>	46
1.5.5.1.	Sintaxe da linguagem de programação do <i>OpenDSS</i>	46
1.5.5.2.	Verbo	47
1.5.5.3.	Parâmetros	48
1.5.5.4.	Comentários	49
1.5.5.5.	Multi Linhas	50
1.6.	MOTIVAÇÃO	51
1.7.	OBJETIVO	52
1.8.	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	53
2.	MODELAGEM DE COMPONENTES DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO PARA ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA E CURTO-CIRCUITO	55
2.1.	MODELOS DE LINHAS.....	55
2.1.1.	Modelo exato de um segmento de linha	55

2.1.2.	O modelo de linha modificada	59
2.1.2.1.	Linha à 3 fios em delta.....	59
2.1.2.2.	O cálculo das correntes de neutro e terra.....	60
2.1.2.3.	Modelo aproximado de segmento de linha	61
2.2.	MODELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	63
2.2.1.	Conexão abaixadora do tipo delta-estrela aterrado	63
2.2.1.1.	Tensões.....	64
2.2.1.2.	Correntes.....	69
2.2.2.	Configuração abaixador do tipo estrela não aterrada-delta	70
2.2.3.	Conexão estrela aterrado-estrela aterrado	72
2.2.4.	Conexão Delta-Delta	74
2.2.5.	Estrela em aberto – delta em aberto.....	75
2.3.	MODELOS DE CARGA	76
2.3.1.	Carga conectada em estrela.....	77
2.3.1.1.	Cargas com potência ativa e reativa constantes	77
2.3.1.2.	Cargas com impedância constante.....	78
2.3.1.3.	Carga com corrente constante.....	78
2.3.1.4.	Cargas combinadas.....	79
2.3.2.	Carga conectada em delta.....	79
2.3.2.1.	Carga com potência ativa e reativa constante	79
2.3.2.2.	Carga com impedância constante	80
2.3.2.3.	Cargas com corrente constante.....	80
2.3.2.4.	Combinação de cargas.....	80
2.3.2.5.	Correntes de linha alimentando uma carga conectada em delta	81
2.3.3.	Cargas bifásicas e monofásicas	81
2.3.4.	Capacitores <i>Shunt</i>	81
2.3.4.1.	Banco de capacitores trifásico conectado em estrela.....	81

2.3.4.2.	Banco de capacitores trifásico conectado em delta.....	82
3.	REALIZAÇÃO DE ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA E CURTO-CIRCUITO NO <i>OPENDSS</i>	84
3.1.	ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA NO <i>OPENDSS</i>	84
3.1.1.	Método da Admitância Primitiva	85
3.1.2.	MÉTODO <i>Zbus</i>	86
3.2.	ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO NO <i>OPENDSS</i>	89
3.2.1.	Análise de Falhas em coordenadas de fase usando matriz <i>Zbus</i>	89
3.2.2.	Estudo completo de curto-circuito.....	93
3.2.3.	Estudo para uma única falha	93
3.2.4.	Estudo de falta Monte Carlo	94
4.	UTILIZAÇÃO DO <i>OPENDSS</i> NO AMBIENTE DO <i>MATLAB</i>	95
4.1.	INTERFACE COM ATRAVÉS DO <i>MATLAB</i>	95
4.1.1.	Interface Text.....	95
4.1.2.	Interface Circuit.....	96
4.1.3.	Interface Solution.....	96
5.	VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS E GERAÇÃO DE RELATÓRIOS DE SAÍDA DO <i>OPENDSS</i>	98
6.	RESULTADOS	102
6.1.	DESCRIÇÃO DO SISTEMA-TESTE PARA A REALIZAÇÃO DE ESTUDOS COM O <i>OPENDSS</i>	102
6.1.1.	Topologia do sistema-teste.....	102
6.1.2.	Dados da rede	104
6.2.	CADASTRO DE DADOS DO SISTEMA-TESTE NO <i>OPENDSS</i>	108
6.3.	CASOS DE ESTUDO - FLUXO DE POTÊNCIA	111
6.3.1.	Definição dos casos de estudo	111
6.4.	CASOS DE ESTUDO - CURTO-CIRCUITO	121
6.4.1.	Definição dos casos de estudo.....	122

7. CONCLUSÕES	129
REFERÊNCIAS.....	131
ANEXO A – RESULTADOS ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA O SISTEMA-TESTE CIGRÉ	133

1. INTRODUÇÃO

1.1. SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Segundo KAGAN; OLIVEIRA E ROBBA (2010), o sistema elétrico de potência é projetado com o objetivo de fornecer energia elétrica para todos os consumidores, sejam eles de pequeno, médio ou grande porte. Esse sistema é responsável pela transformação de uma energia de alguma fonte (hidráulica, mecânica, marés, vento, etc.) em energia elétrica. Outra responsabilidade dele, é a de distribuir essa energia de forma adequada de acordo com a demanda de cada consumidor conectado à ele.

No caso do Brasil, é predominante a conversão da energia mecânica gerada na queda d'água em elétrica através de usinas hidroelétricas. O fato desse centro de transformação estar comumente afastado dos grandes centros de consumo leva a necessidade de se implementar uma grande rede entre ambos para que seja realizado o transporte de energia elétrica.

Quando a energia elétrica chega aos grandes centros de consumo é preciso, devido a uma grande diversidade de características e demandas entre as cargas, de uma estrutura que consiga diferenciar cada um desses consumidores, realizando o fornecimento de forma adequada.

Dessa forma o sistema elétrico de potência pode ser dividido em três blocos:

- a) Geração: função de converter alguma fonte de energia em energia elétrica;
- b) Transmissão: responsável pelo transporte de energia elétrica dos centros de produção aos centros de consumo;
- c) Distribuição: bloco do sistema elétrico de potência responsável por receber a energia vinda do bloco de transmissão. É na distribuição onde se localizam a maioria dos consumidores, principalmente os residenciais. Neste tipo de bloco as cargas presentes possuem uma diversidade muito grande e devido a isso vários elementos são inseridos neste sistema para que todas possam ser atendidas com qualidade de acordo com a norma vigente.

1.2. REDES DE DISTRIBUIÇÃO

1.2.1. Redes de distribuição de alta tensão

As redes de distribuição de alta tensão tem como papel principal o de captar a energia das subestações de redes de distribuição de alta tensão e transferi-las às SEs de distribuição de média tensão e aos consumidores. Operando através de linhas trifásicas usualmente, de 138 kV, 69 kV e 34,5 kV, com capacidade de 20 MW a 150 MW. Consumidores que possuem as tensões em níveis de alta tensão são usualmente as estações de tratamento e bombeamento de água, grandes instalações industriais, entre outros. Em relação a topologia, as redes de distribuição de alta tensão podem operar na configuração radial ou em malha (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

1.2.1.1. Arranjos

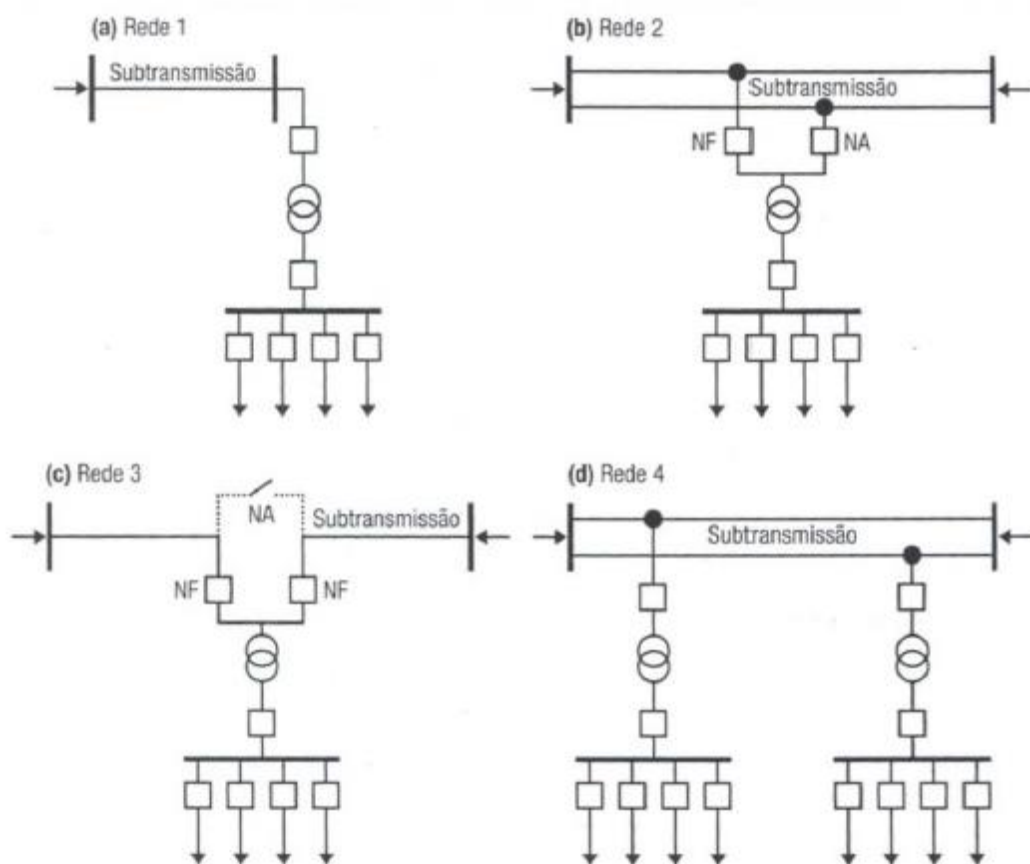


Figura 1: Arranjos típicos de redes de distribuição de alta tensão

a) Rede 1: Configuração que apresenta o menor custo de implantação representada na Figura 1.a, utilizada somente quando o transformador da SE de distribuição não excede a faixa de 10 a 15 MVA. O ponto negativo desse tipo de

arranjos é o fato de qualquer defeito que ocorra na rede ocasionara a interrupção de fornecimento à SE, logo ele não possui uma alta confiabilidade. A chave de entrada é usualmente uma chave fusível, porém, caso o transformador fique protegido por um sistema de proteção poderá ser usada uma chave seccionadora.

b) Rede 2: Representada na Figura 1.b, esse tipo de configuração tem a vantagem do fato de ocorrendo um defeito no alimentador de redes de distribuição de alta tensão com o disjuntor normalmente fechado a carga é transferida para o alimentador com o disjuntor normalmente aberto que passará a ser fechado.

c) Rede 3: Nesta configuração, Figura 1.c, o barramento de alta da SE passa a fazer parte da redes de distribuição de alta tensão. Ocorrendo uma falha, o sistema se comportará de forma semelhante a topologia da Rede 2, diferenciando-se apenas pelo fato de que um defeito no barramento de alta da SE impõe o seccionamento da rede pela abertura da duas chaves de entrada. Pode-se instalar uma chave de seccionamento antes das duas chaves de entrada. Disjuntores são comumente usados na função de chaves de entrada.

d) Rede 4: Conhecido como “sangria”, este tipo de arranjo, Figura 1.d, é de confiabilidade e custos inferiores aos da rede 2 e 3. Sua aplicabilidade encontra-se em regiões onde há vários centros de cargas com uma baixa demanda. Visando a proteção da linha são usados disjuntores ou fusíveis nas chaves de entrada.

1.2.1.2. Subestações de distribuição

As subestações de distribuição são supridas pela rede de distribuição de alta tensão e alimentam a rede de distribuição de média tensão. Dentro dessas subestações existem um conjunto de equipamentos que realizam a redução do nível de tensão. Para cada nível de potência instalada é possível obter uma configuração diferente para este tipo de subestação.

Em SEs que atendem regiões de baixos níveis de carga, é comum encontrar o seu transformador com potência nominal na ordem de 10 MVA e um arranjo designado por “barra simples”, com um custo bastante baixo. Este tipo de arranjo pode ser suprido tanto por apenas uma linha, Figura 2, como também, visando a confiabilidade do sistema, ser suprido por duas linhas, Figura 3 (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

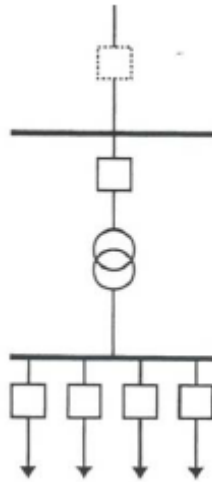


Figura 2: Barra simples - Um circuito de suprimento

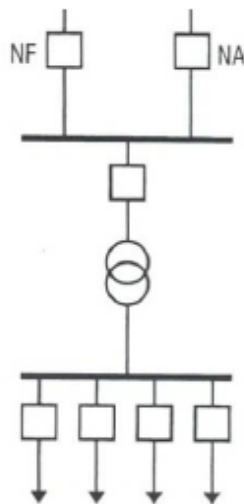


Figura 3: Barra simples – Dois circuitos de suprimento

Para o caso em que essa subestação tem apenas uma linha como suprimento a sua confiabilidade é baixa, já que, em caso de algum defeito na distribuição em alta tensão, haverá a total perda de suprimento da SE. Para solucionar essa problema é adicionado mais uma linha de distribuição em alta tensão para suprir essa subestação de média tensão. Sendo que, uma das linhas irá operar com a chave de entrada da subestação no estado normalmente aberta e a outra linha com a chave no estado normalmente fechada. Dessa forma, ocorrendo uma falha na linha de suprimento a chave NF irá abrir e a chave NA, do circuito de reserva, será fechada. Em caso de haver necessidade de manutenção do transformador da SE ou do barramento, será

preciso haver o desligamento da SE. Para realizar a manutenção dos disjuntores de saída será necessário a instalação de uma interconexão nos alimentadores saída, para isso são instaladas chaves no estado NA e durante a manutenção transfere-se a carga de um alimentador para o outro e isola-se o disjuntor.

No caso da região de atendimento da SE possuir uma densidade de carga alta, será necessário utilizar um arranjo em que aumenta-se o número de transformadores, a confiabilidade e a flexibilidade operacional. No diagrama unifilar apresentado na Figura 4, é possível observar a presença de um circuito duplo de alimentação, barramentos de alta tensão independentes, dois transformadores e o barramento de média tensão com um seccionamento. Na ocorrência de algum defeito, ou necessidade de manutenção nos transformadores da subestação, as chaves tanto da entrada como da saída do transformador serão abertas e o mesmo estará isolado, para não interromper o fornecimento dos clientes que dependem do circuito do transformador em manutenção, será feita uma realocação de carga através do fechamento a chave NA que realiza o seccionamento do barramento e dessa forma os dois circuitos de distribuição de média tensão estarão sendo supridos pelo transformador que não se encontra em manutenção (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

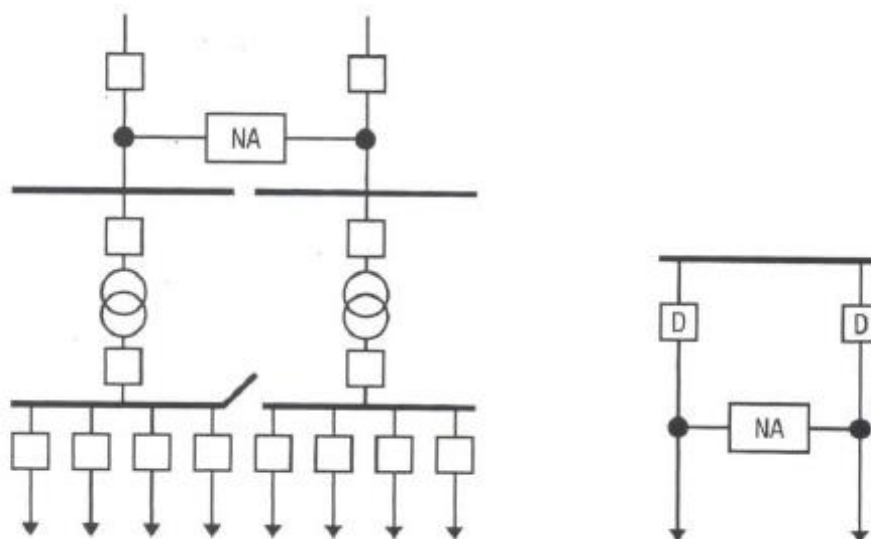


Figura 4: Barra dupla com dois circuitos de suprimento – saída dos alimentadores primários

Segundo KAGAN; OLIVEIRA E ROBBA (2010), para que ocorra qualquer tipo de manobra nos alimentadores, os transformadores responsáveis pelo suprimento da carga precisam estar dimensionados a ponto de atender qualquer eventualidade em que seja necessário a transferência da carga de um ponto para o outro sem comprometer o funcionamento do sistema como um todo. É usual definir-se, para SEs com mais de um transformador a potência instalada, S_{inst} , como sendo a soma das potências nominais de todos os transformadores, e “potência firme”, S_{firme} , aquela que a SE pode suprir quando acontece a saída de serviço do maior transformador existente na SE. No caso de uma SE com “n” transformadores, de potências nominais $S_{nom}(i)$, com $i=1, \dots, n$, admitindo-se que o transformador “k” é o de maior potência e que, em condição de contingência, os transformadores podem operar com sobrecarga, em pu, de f_{sob} , valor clássico 1,40, isto é, 40% de sobrecarga, e que seja possível a transferência de potência, S_{trans} , para outras SEs, pela rede primária, através de manobras rápidas de chaves, ter-se-á para a potência firme o valor:

$$S_{inst} = \sum_{i=1, n} S_{nom}(i) \quad (1)$$

$$S_{firme} = f_{sob} \sum_{\substack{i=1, n \\ i \neq k}} S_{nom}(i) + S_{trans} \quad (2)$$

Há também a possibilidade de construção do arranjo apresentado na Figura 5, onde a principal evolução está no fato de existirem diversos pontos de transferência de cargas entre os transformadores. Este tipo de topologia oferece uma maior confiabilidade no atendimento ao cliente, já que, caso ocorra alguma adversidade na rede, o número de clientes afetados será o menor possível.

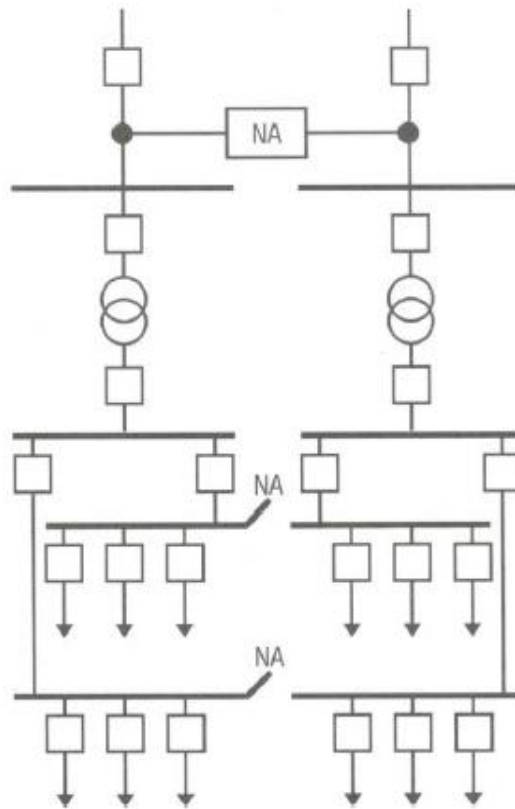


Figura 5: Barra dupla com disjuntor de transferência

Uma possibilidade de aumentar a flexibilidade para atividades de manobra dos disjuntores da SE é a utilização do arranjo de uma barra principal e transferência. Na fig.1.9 [Figura 6 desta monografia] apresenta-se o diagrama unifilar deste arranjo, destacando-se que: todos os disjuntores são do tipo extraível, ou contam com chaves seccionadoras em ambas as extremidades; o disjuntor que perfaz a interligação entre os dois barramentos é designado por disjuntor de transferência. Em operação normal o barramento principal é mantido energizado e o de transferência é mantido aberto. Desejando-se realizar manutenção, corretiva ou preventiva, num qualquer dos disjuntores, o procedimento resume-se nos passos a seguir:

- Fecha-se o disjuntor de transferência, energizando-se o barramento de transferência;
- Fecha-se a chave seccionadora do disjuntor que vai ser desligado, passando a saída do circuito a ser suprida pelos dois barramentos;
- Abre-se o disjuntor e procede-se à sua extração do cubículo, ou, caso não extraível, abre-se suas chaves seccionadoras, isolando-o;
- Transfere-se a proteção do disjuntor que foi desenergizado para o de transferência;

Ao término da manutenção o procedimento é o inverso, isto é:

- Insere-se o disjuntor no cubículo, ou fecham-se as suas chaves;
- Abre-se a chave seccionadora de transferência;
- Abre-se o disjuntor de transferência e retorna-se a proteção ao disjuntor principal.

Neste arranjo de SE, para a manutenção do barramento principal, é necessário sua desenergização, impossibilitando o suprimento aos alimentadores. Este inconveniente pode ser sanado utilizando-se um barramento adicional, “barramento de reserva” (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010, p. 12-13).

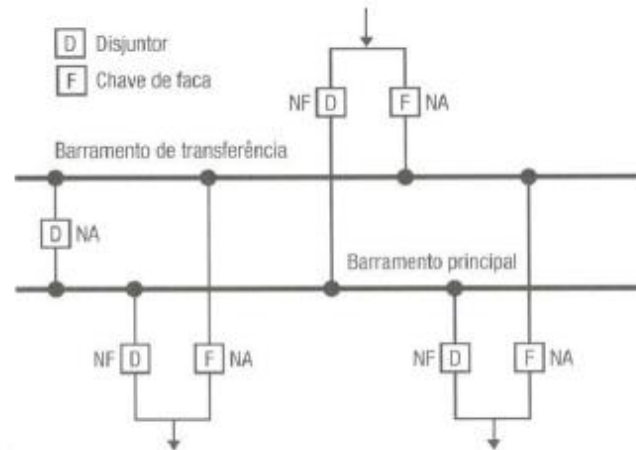


Figura 6: Subestação com barra principal e barra de transferência

1.2.2. Redes de distribuição de média-tensão

As redes de distribuição de média-tensão são responsáveis pelo atendimento dos consumidores primários e aos transformadores de distribuição, estações transformadoras, que suprem a rede secundária, ou baixa tensão. Como consumidores primários estão as indústrias de médio porte, shopping centers, hospitais, entre outros. Em relação à sua topologia as redes de distribuição de média tensão operam de forma radial podendo haver uma transferência de blocos de carga entre os circuito para o atendimento da operação em condições de contingência. Os troncos dos alimentadores de média-tensão empregam, usualmente, condutores de seção 336,4 MCM permitindo, na tensão de 13,8 kV, o transporte de potência máxima de cerca de 12 MVA, que, face à necessidade de transferência de blocos de carga entre alimentadores, fica limitada a cerca de 8 MVA. As redes de distribuição de média-tensão podem ser divididas em aéreas e subterrâneas, possuindo as seguintes configurações: (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

- a) Configurações das redes primárias aéreas:
 - Primário seletivo;
 - Primário radial com socorro.
- b) Configurações das redes primárias subterrâneas:
 - *Spot network*;
 - Primário operando em malha aberta;
 - Primário seletivo.

1.2.2.1. Redes aéreas – Primário radial

As redes aéreas são construídas utilizando-se postes de concreto, ferro, madeira ou fibra, isso dependerá das condições do solo e características climatológicas do local onde ele será instalado. Nos topos dos postes se encontram as cruzetas, podendo as mesmas serem de ferro, madeira ou concreto. Sob as cruzetas estão os isoladores, que pode ser de porcelana, fibra ou polimérico. Nas redes de distribuição de média-tensão são usados condutores de alumínio com alma de aço, CAA, ou sem alma de aço, CA, nus ou protegidos. Cabos protegidos são aqueles que possuem uma membrana externa que tem como objetivo proteger contra contatos esporádicos como por exemplo, galhos de árvores, isto sem isolar o condutor. Com a evolução da tecnologia ocorreu o desenvolvimento de técnicas que pudessem substituir as cruzetas por estruturas isolantes que receberam a denominação de “*spacer cable*” que permite a sustentação dos cabos protegidos. Este tipo de estrutura possui um custo, de instalação e manutenção, bem mais elevado em comparação com a tradicional que faz uso de cruzetas e isoladores. A “*spacer cable*” proporciona uma redução sensível da taxa de falhas devido a redução do espaçamento entre os condutores, torna possível a expansão da rede de energia de média tensão em regiões onde não era possível a utilização da linha convencional, com cruzeta.

Na Figura 7 podemos observar o diagrama unifilar de uma rede primária com a presença do tronco dos alimentadores bem como os seus ramais. Estão esquematizadas as chaves fusíveis que são responsáveis pela proteção das derivações do tronco para o ramal, as mesmas se encontram normalmente fechadas (NF). Outro ponto a se observar no diagrama é a presença de uma chave faca com o estado de normalmente aberta que tem como função a realização de manobras nos alimentadores ou quando se há a necessidade de transferência de carga de um alimentador para o outro (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

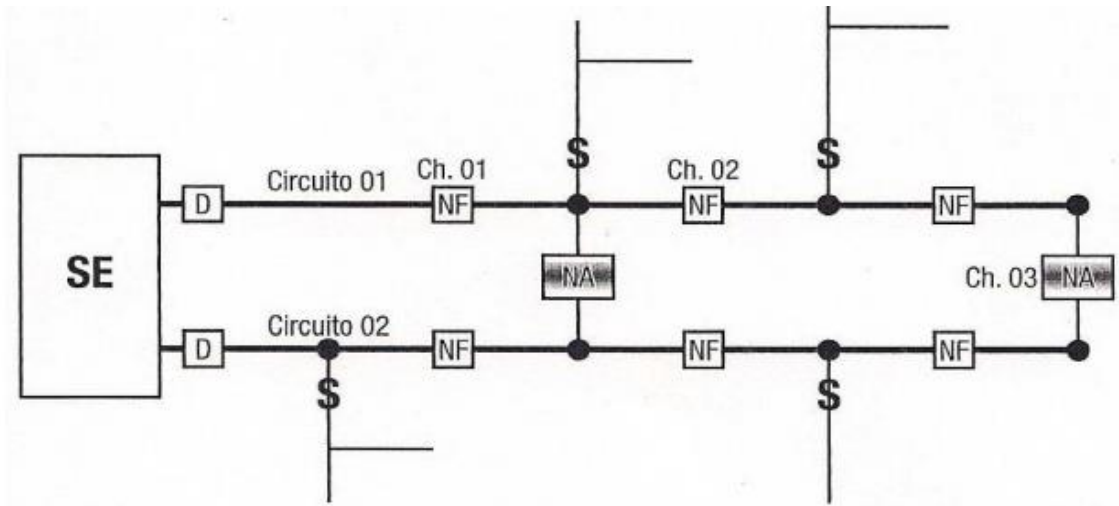


Figura 7: Diagrama da configuração primário radial

1.2.2.2. Redes Aéreas – Primário Seletivo

Neste tipo de configuração, representada na Figura 8, o consumidor está conectado a ambos alimentadores através de uma chave. Uma das chaves estará no estado normalmente fechada (NF) e a outra no estado normalmente aberta (NA). Em caso de detecção de falta de tensão no alimentador conectado através da chave NF, haverá uma transferência do consumidor para o alimentador com a chave NA que passará para o estado NF. É exigência que cada alimentador tenha capacidade de atender de forma adequada as cargas do outro. Sendo assim, o carregamento admissível deve ser limitado a 50% do limite térmico (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

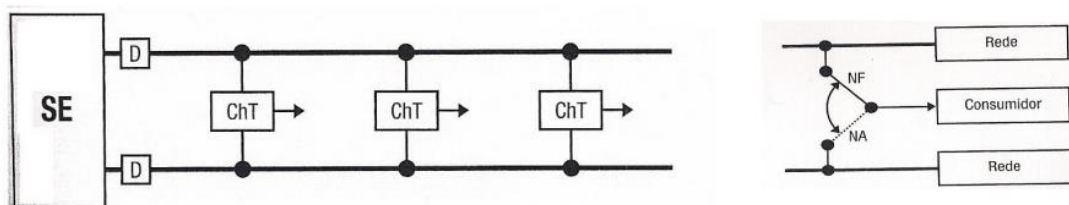


Figura 8: Diagrama unifilar da configuração primário seletivo com a operação das chaves em caso de detecção de falta

1.2.2.3. Redes subterrâneas - Primário operando em malha aberta

As redes subterrâneas operando em malha aberta possuem um custo de implantação e manutenção mais elevado que as configurações apresentadas anteriormente. Sua aplicação encontra-se em regiões com alta densidade de cargas com grandes consumidores. Neste tipo de arranjo, Figura 9, as cargas estão agrupadas em barramentos com dois disjuntores nas suas extremidades e o alimentador possui um seccionamento em um ponto desejado através de um disjuntor que está no estado normalmente aberto (NA). Na ocorrência de alguma falha no trecho da rede, isola-se a mesma, através da abertura dos disjuntores que se encontraram na entrada do trecho, e os barramentos desenergizados passam a ser alimentados pelo disjuntor NA, que é acionado automaticamente. Por se tratar de um arranjo com um alto nível de sofisticação o investimento necessário para sua implantação é elevado. O circuito opera com 50% da sua capacidade, com uma reserva para caso ocorram contingências (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). Na Figura 9 encontra-se o diagrama unifilar de uma circuito primário operando em malha aberta.

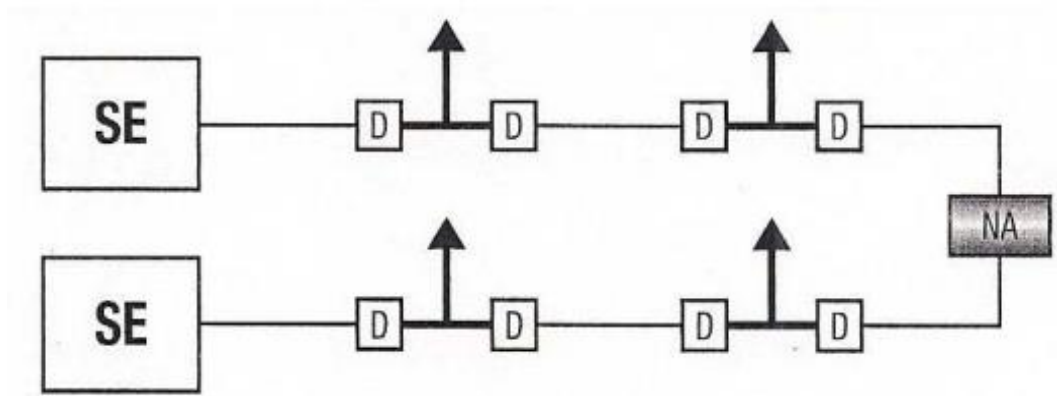


Figura 9: Diagrama unifilar da configuração de uma rede subterrânea com o primário operando em malha aberta

1.2.2.4. Redes subterrâneas – *Spot network*

Nesta configuração os transformadores de distribuição são supridos por diferentes circuitos. Sendo que os circuitos podem derivar tanto da mesma SE quando de SE's distintas.

Na fig. 1.13 [Figura 10 desta monografia] apresenta-se o diagrama unifilar de uma rede do tipo *spot network* com dois circuitos que se derivam de uma mesma SE. Observa-se, no barramento de paralelo dos dois circuitos, nos transformadores, a existência de uma chave especial, NP, designada por *network protector*, que tem por finalidade impedir o fluxo de potência no sentido inverso. Assim, assumindo-se a existência de um curto-circuito num dos trechos da rede ter-se-á a circulação de correntes apresentada na fig. 1.14 [Figura 11 desta monografia] observa-se que todos os NP do circuito onde estabeleceu o curto-circuito são percorridos por corrente em sentido inverso e, de consequência, irão abrir, isolando-se, após a abertura do disjuntor da SE, todo circuito com defeito. As cargas do sistema estarão energizadas pelo outro circuito. (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBIA, 2010, p. 16-17).

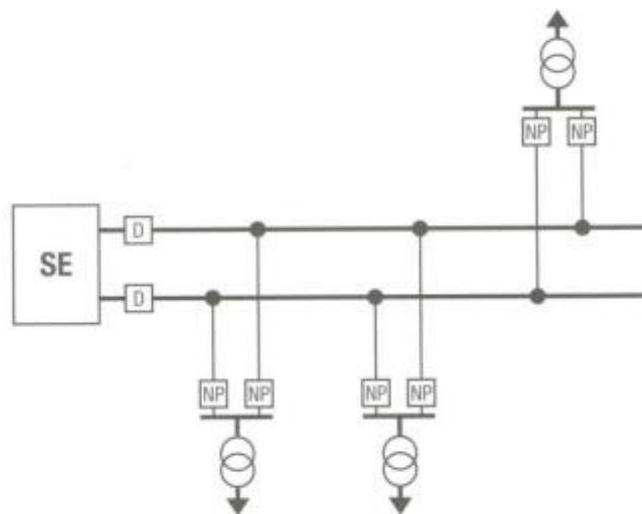


Figura 10: Diagrama unifilar da configuração de rede spot network

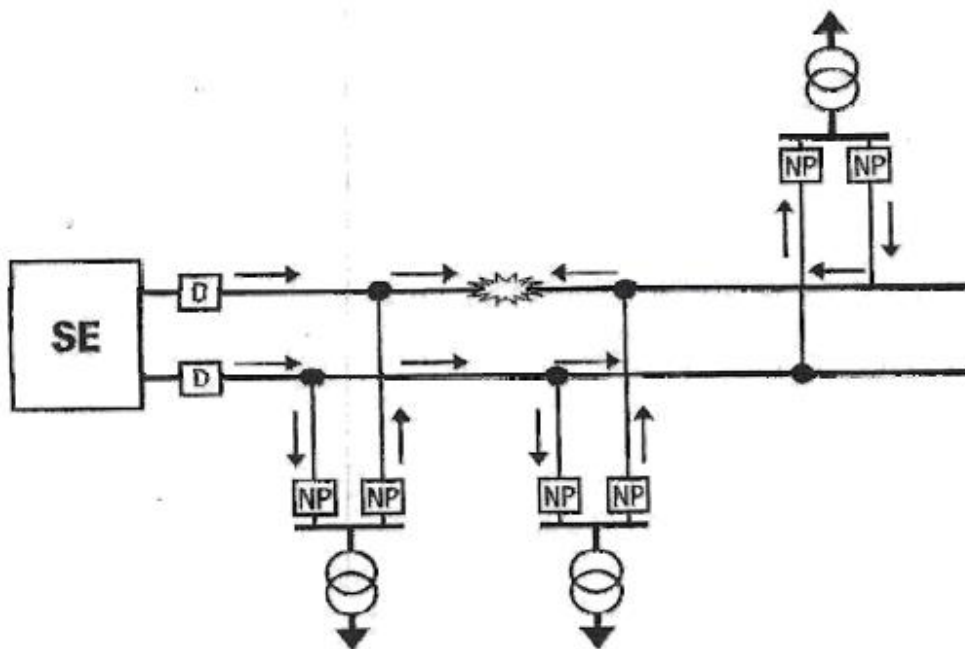


Figura 11: Diagrama unifilar da configuração de rede spot network com a representação das correntes de defeito

A confiabilidade deste sistema é muito alta, porém o custo das redes em *spot network* é muito elevado, justificando-se sua utilização somente em áreas de grande densidade de carga.

1.2.2.5. Estações transformadoras

As estações transformadoras são constituídas por transformadores e têm como função a redução do nível de média-tensão para baixa-tensão para assim poder atender de forma adequada consumidores que possuem tensões nos níveis 220/127 V ou 380/220 V. Os transformadores estão comumente equipados com chaves fusíveis para a proteção contra sobrecorrentes como para a realização do desligamento do equipamento em caso de manutenção; há também a presença de para-raios, no primário, para a proteção contra sobrecorrentes. Estes transformadores são encontrados comumente com as seguintes potências nominais: 5,0 - 10,0 - 15,0 - 30,0 - 45,0 - 75,0 - 112,5 e 150 kVA (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

1.2.3. Redes de distribuição de baixa-tensão

As redes de distribuição de baixa-tensão são aquelas derivadas dos transformadores presentes ao longo dos alimentadores de média-tensão. Através dela são atendidos os consumidores, em sua maioria residencial, com tensões nos níveis 220/127 V ou 380/220 V, podendo operar tanto em malha quando em radial. As redes de distribuição de baixa-tensão podem ser do tipo aérea ou reticulada.

1.2.3.1. Rede secundária aérea

Este tipo de configuração pode se apresentar tanto de forma radial ou em malha. Na Figura 12 está o esquema que demonstra como uma configuração deste tipo deixa de ser do tipo em malha e passa a ser radial. Isso acontece quando a rede alcança seu limite de carregamento, então para resolver o problema é adicionado um outro transformador e realizado o seccionamento da malha nos pontos A e A' da Figura 12. Este tipo de procedimento é comumente chamado de divisão de área. (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

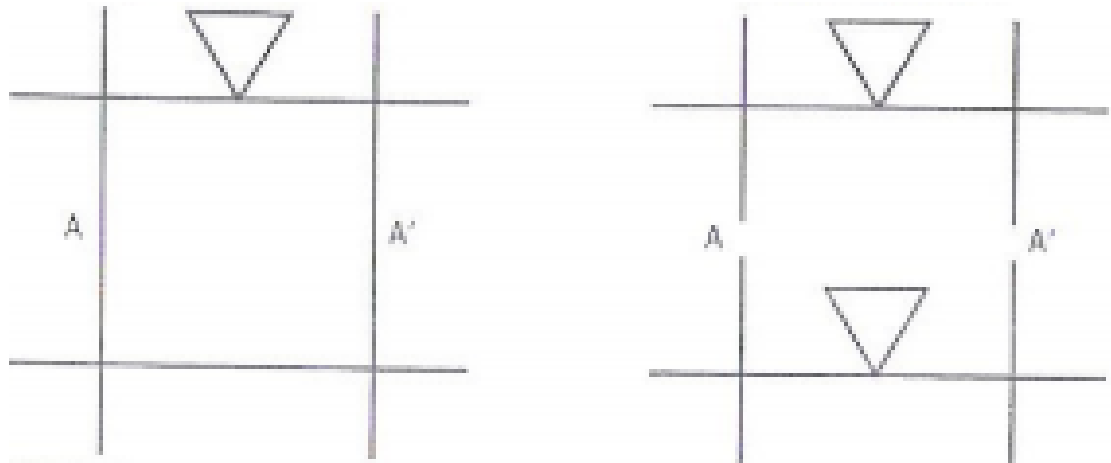


Figura 12: Evolução de rede de baixa tensão

1.2.3.2. Rede reticulada

A rede reticulada, como o próprio nome indica, é constituída por um conjunto de malhas que são supridas por transformadores trifásicos, com seus terminais de baixa tensão inseridos diretamente nos nós do reticulado, conforme fig. 1.17 [Figura 13 desta monografia]. Entre dois nós é usual utilizar-se, em cada fase, três cabos em paralelo. Isto é feito visando aumentar a confiabilidade e a capacidade de carregamento do sistema. Destaca-se que este tipo de rede, face a apresentar custo extremamente elevado, não é mais construído. (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010, p. 19-20).

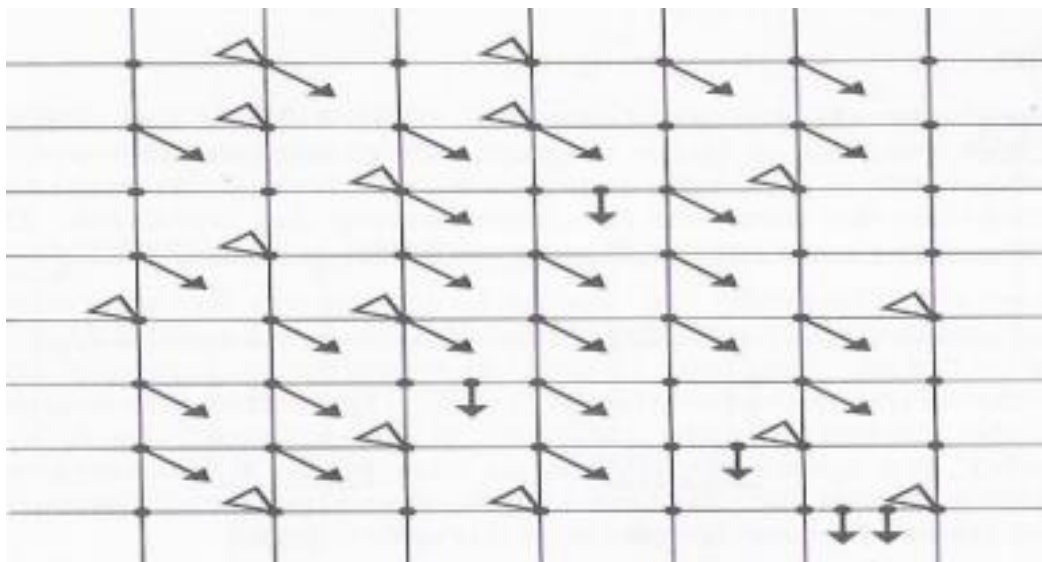


Figura 13: Rede secundária reticulada

1.3. ESTUDOS TÍPICOS REALIZADOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Segundo KERSTING (2012), a análise de um alimentador de sistema de distribuição de energia elétrica pode ser dividida em dois estudos básicos:

- a) Análise do fluxo de potência: análise realizada sob condições de regime normal do alimentador
- b) Estudo de curto-circuito: análise realizada sob condições de curto-circuito

1.3.1. Fluxo de potência

O estudo do fluxo de potência é um dos mais importantes na análise de um sistema de distribuição de energia elétrica, sendo usado por concessionárias do setor em áreas como planejamento, manutenção, operação e automação. Através da análise do fluxo de potência de um alimentador é possível obter as seguintes grandezas por fase ou trifásica total:

- Perdas totais no alimentador;
- Fluxo na linha de cada seção em kW e kVAr, magnitude e ângulo de fase da corrente, ou ampères e fator de potência;
- Valores das magnitudes das tensões e ângulos em todos os nós do alimentador;
- Perdas em cada linha do alimentador estudado;
- Potência ativa e reativa de uma carga de acordo com o modelo de carga utilizado;
- Carregamento total do alimentador em kW e kVAr.

1.3.2. Estudo de curto-circuito

A Figura 14 apresenta um alimentador desbalanceado modelado para estudos de curto-circuito. Um curto-circuito pode acontecer em cada um dos 5 pontos apresentados. O ponto 1 indica o lado de alta da subestação de distribuição em média tensão. Os parâmetros da rede de distribuição de alta tensão são determinados por um estudo de curto-circuito em alta-tensão. Como exemplo de parâmetros pode-se citar as potências aparentes de curto-circuito trifásico e monofásico e também as impedâncias de sequência positiva e zero. Para obter os parâmetros de curto-circuito nos pontos 2,3,4 e 5 será preciso calcular o equivalente trifásico de Thévenin no ponto de curto-circuito.

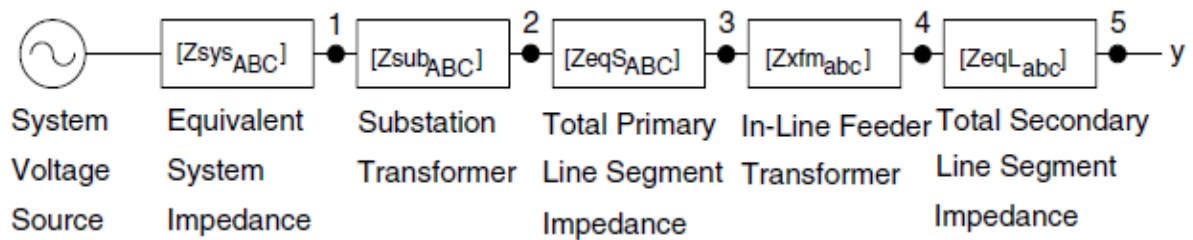


Figura 14: Alimentador com fases desequilibradas modelado para análise de curto-circuito

1.3.2.1. Tipos de curto-circuito

- Falta trifásica

$$V_{ax} = V_{bx} = V_{cx} = 0 \quad (3)$$

- Falta trifásica para o terra

$$V_{ax} = V_{bx} = V_{cx} = V_{xg} = 0 \quad (4)$$

- Falta linha-linha (fases i e j com falta e fase k sem falta)

$$\begin{aligned} V_{ix} &= V_{jx} = 0 \\ I_{fk} &= 0 \\ I_{fi} + I_{fj} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

- Falta linha-terra (fase k com falta e fases i e j sem falta)

$$\begin{aligned} V_{kx} &= V_{xg} = 0 \\ I_{fi} &= I_{fj} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

1.4. SOFTWARES USADOS NA ANÁLISE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Durante o final do século 20 com a expansão do uso de computadores começaram a ser desenvolvidos os primeiros métodos computacionais para análise de redes de distribuição elétrica. De lá para cá eles foram aprimorados e diversos softwares foram criados e puderam trazer aos operadores do sistema a possibilidade de estudos mais profundos e análises mais rápidas e precisas. A seguir serão apresentados alguns dos softwares mais usados na análise de sistemas de distribuição de energia elétrica.

1.4.1. Softwares comerciais usados na análise de redes de distribuição

1.4.1.1. Cymdist

O *CYMDIST* é um software que executa vários tipos de análises em sistemas monofásicos, bifásicos ou trifásicos que operam de forma radial, em loop ou em malha.

O software inclui um editor de rede completo, assim como:

- Fluxo de potência desbalanceado;
- Análise detalhada de falhas;
- Balanceamento de cargas;
- Alocação e estimação de cargas;
- Alocação ótima de capacitores.

O software *CYMDIST Distribution Analysis* é um conjunto de aplicações composto por um editor de rede, módulos de análise e bibliotecas de modelos customizáveis pelo usuário, dos quais pode-se escolher a solução mais adequada.

O programa é projetado para estudos de planejamento e simulação do comportamento de redes de distribuição de energia elétrica sob diferentes condições de operação e cenários. Isso inclui várias funções internas que são exigidas para o planejamento, operação e análise.

O área de trabalho do software é totalmente customizável. A representação gráfica dos componentes da rede, resultados e relatórios podem ser construídos e modificados para fornecer o nível de detalhamento necessário. Tecnologias inovadoras de engenharia, práticas e padrões da indústria estão no cerne dos algoritmos do *CYMDIST*, interface de usuário flexível e extensas bibliotecas.

As funções de análise como fluxo de potência, curto-circuito e otimização das redes são realizadas em redes de distribuição tanto balanceadas quanto desbalanceadas que são construídas com qualquer combinação de fases e configurações.

Além disso, o *CYME COM module* permite que o ambiente de escolha do usuário se comunique com o software *CYMDIST* para acessar diferentes funções e cálculos pré-definidos; e através de códigos em *Phyton*, o usuário pode ampliar as

funcionalidades do software *CYME*. Todas informações referentes ao software estão disponíveis no link <http://www.cyme.com/software/cymdist/>.

A Figura 15, apresenta a interface do software *CYMDIST*.

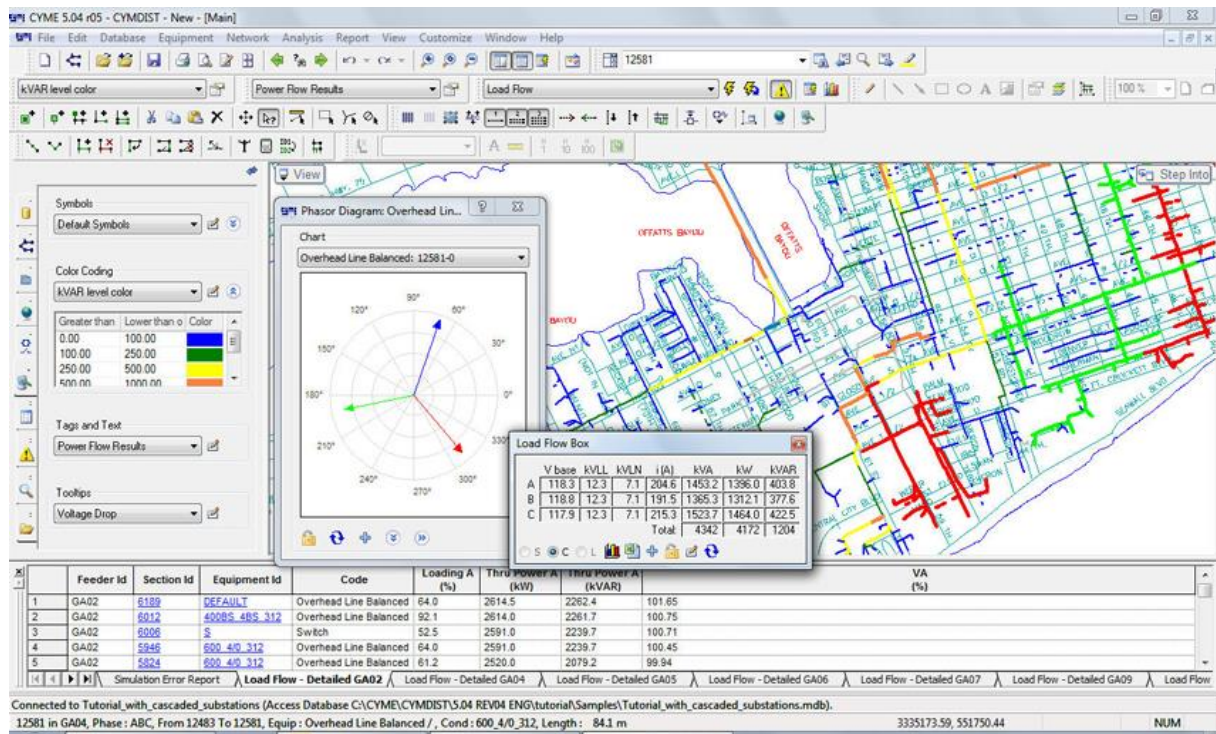


Figura 15: Interface do software CYMDIST (Fonte: Website do software CYMDIST¹)

1.4.1.2. Milsoft Engineering Analysis(EA) WindMil

O software WindMil modela e analisa redes de distribuição de energia elétrica para o planejamento e operação do sistema. A seguir alguns dos estudos realizados pelo software.

- Análise de queda de tensão e fluxo de potência;
- Análise de curto-circuito, corrente de falta e localização de falta;
- Análise de risco de incêndio devido a formação de arco elétrico;
- Modela todas as fases em todos os níveis de tensão;
- Modela soluções em malha ou radiais;
- Modela carregamentos e impedâncias desequilibrados;
- Modela fontes de geração distribuídas.

¹ Disponível em < <http://www.cyme.com/software/cymdist/> >. Acesso em 02/06/2017

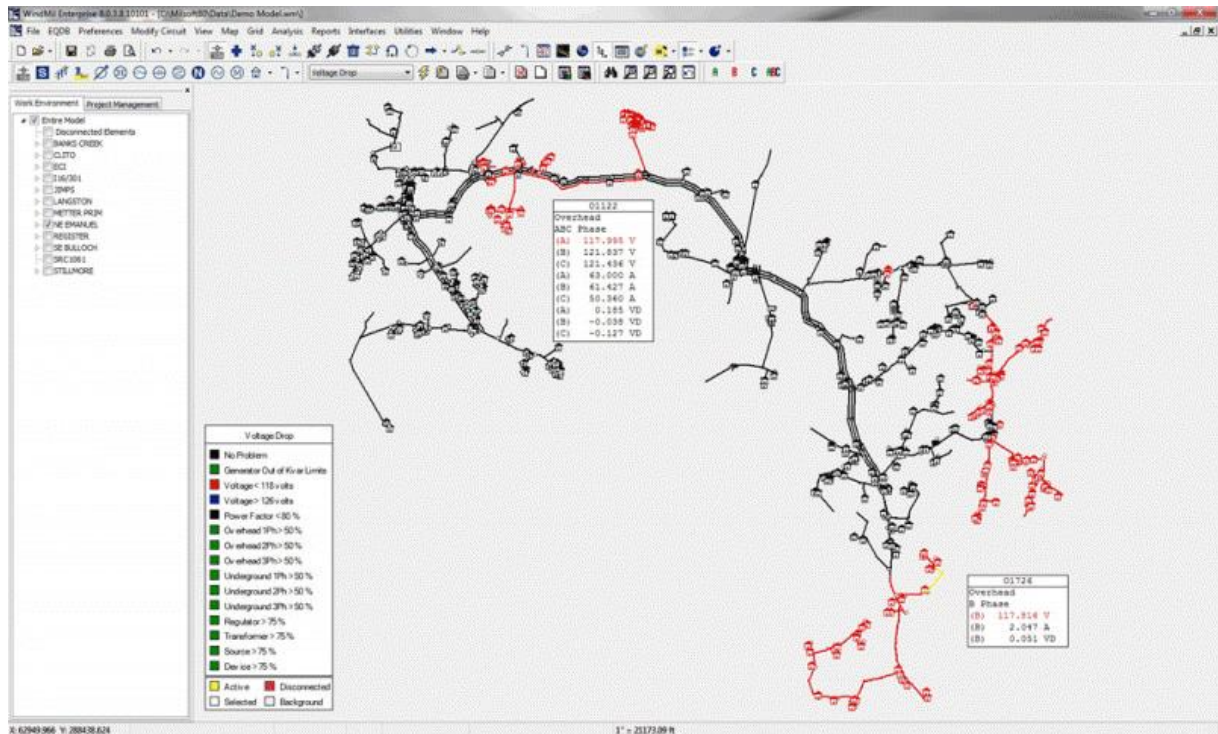


Figura 16: Interface do software WindMil (Fonte: Website do software WindMil²)

Todas informações referentes ao software estão disponíveis no link <https://www.milsoft.com/utility-solutions/upgrades/milsoft-engineering-analysis-ea-windmil®>.

1.4.2. Softwares de código aberto

1.4.2.1. *OpenDSS*

O Open Distribution System Simulator (*OpenDSS*) é um software de simulação para sistemas elétricos de distribuição de energia elétrica. O *OpenDSS* é implementado em duas versões. A primeira corresponde a um programa executável autônomo e a segunda a um servidor *COM (Component Object Model)* implementado a partir de uma *DLL*. Na versão autônoma há uma interface para o usuário mostrada na Figura 17 que permite a descrição de circuitos, a solução e a visualização de resultados. No segundo caso, o *OpenDSS* pode ser controlado por uma variedade de plataformas de softwares existentes.

² Disponível em < <https://www.milsoft.com/utility-solutions/upgrades/milsoft-engineering-analysis-ea-windmil%C2%AE>>. Acesso em 02/06/2017

O programa suporta a maioria das análises em regime permanente senoidal (*RMS*) comumente realizadas para análise e planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica. Além disso, o *OpenDSS* é capaz de realizar novos tipos de análises que são necessárias para atender as necessidades futuras relacionadas as Redes Elétricas Inteligentes. Muitos dos recursos encontrados no programa foram originalmente destinados a dar suporte às necessidades das análises de eficiência energética do transporte de energia e análise harmônica. Por fim, o *OpenDSS* foi projetado para ser indefinidamente expansível de tal modo que possa ser facilmente modificado para atender as necessidades futuras ou para atender as necessidades específicas dos usuários (DUGAN, 2013).

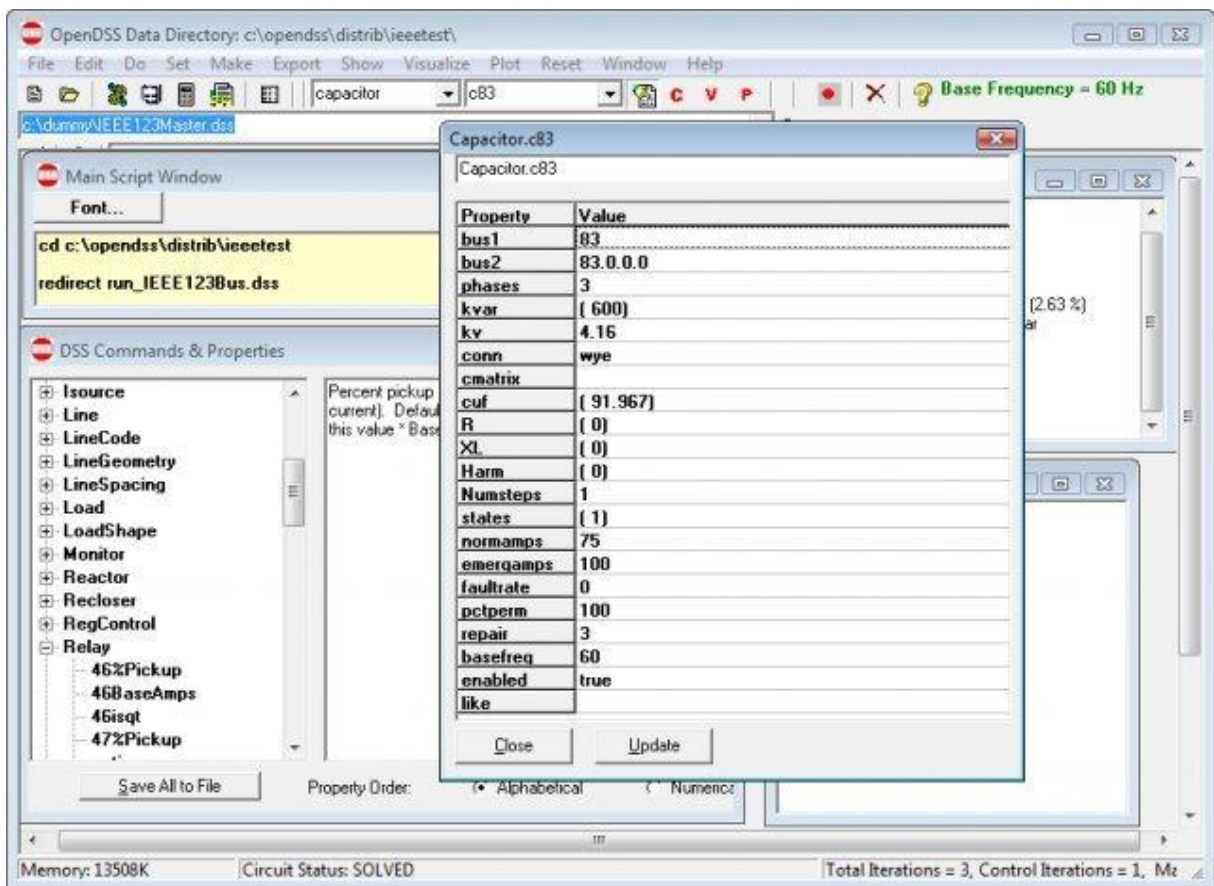


Figura 17: Interface do software OpenDSS (Fonte: Website do software OpenDSS³)

³ Disponível em < <https://sourceforge.net/projects/electricdss/>>. Acesso em 02/06/2017

1.4.2.2. GridLAB-D™

GridLAB-D™ é um ambiente de simulação flexível e baseado em agentes, projetado para modelar não só apenas o sistema de potência, mas também os sistemas sobrepostos que afetam o sistema de potência. Na sua forma mais simples, o GridLAB-D™ examina a interação detalhada entre todos os elementos de um sistema de distribuição, da subestação até o consumidor. O GridLAB-D™ fornece um banco de teste valioso para avaliação de estratégias de controle. O software fornece uma caixa de informações para o estudo e efeitos de tecnologias de redes inteligentes, sem os custos e complexidades das demonstrações em campo. A seguir estão descritas algumas das funcionalidades do GridLAB-D™.

- Planejamento/Estimativa da automação na distribuição;
- Gestão do pico de carga;
- Geração distribuída e armazenamento.

A Figura 18, demonstra a interface do software GridLAB-D™.

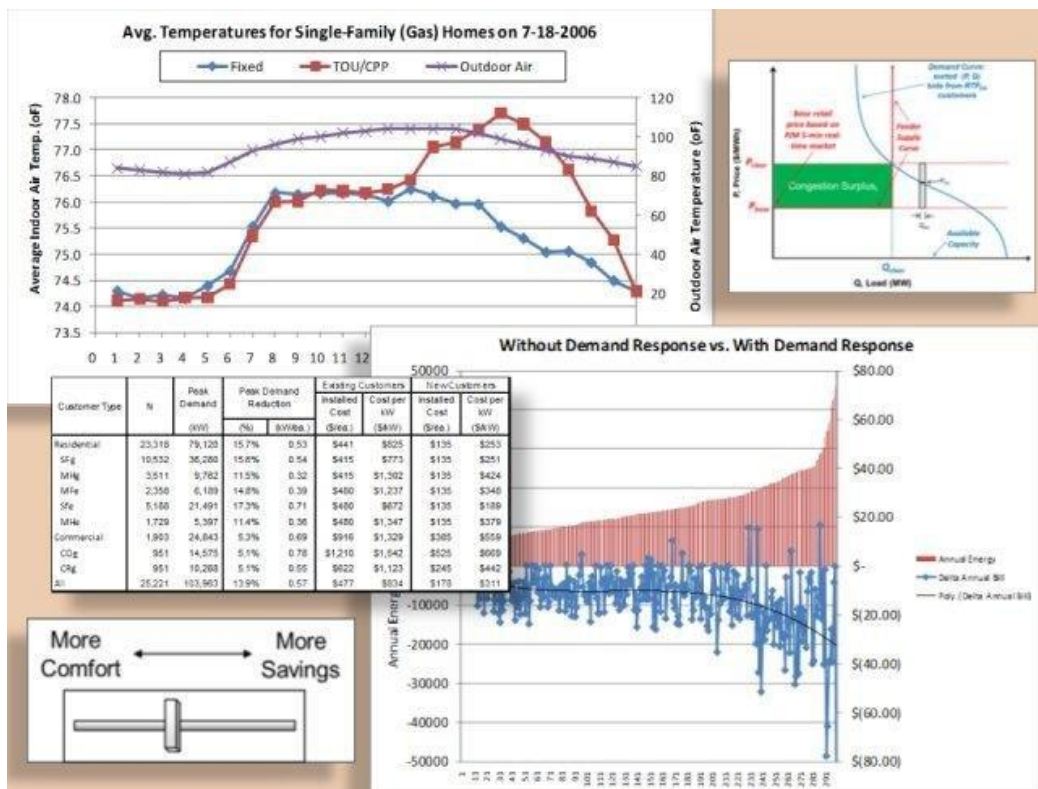


Figura 18: Interface do software GridLAB-D™ (Fonte: Website do software GridLAB-D™⁴)

⁴ Disponível em < <http://www.gridlabd.org/>>. Acesso em 02/06/2017

Todas informações referentes ao software estão disponíveis no link <http://www.gridlabd.org/>.

1.5. INTRODUÇÃO SOBRE O *OPENDSS*

O *OpenDSS* é um software de código aberto (“*Open Source*”) para a simulação de sistemas elétricos de potência orientada para análise de redes de distribuição de energia elétrica. Este programa tem capacidade para realizar todos os estudos no domínio da frequência (regime permanente senoidal) que são comumente realizados por empresas de distribuição de energia elétrica. Adicionalmente, o *OpenDSS* é capaz de realizar várias análises requeridas para atender as necessidades futuras das concessionárias de distribuição, tais como: redes elétricas inteligentes, modernização da rede elétrica, pesquisas associadas com fontes de energia renováveis. O *OpenDSS* tem sido desenvolvido desde 1997 pelo *Electric Power Research Institute* (“EPRI”) para dar suporte a vários projetos de consultoria e pesquisa que exigem a análise de redes de distribuição de energia elétrica. Muitas das características encontradas no Open DSS foram originalmente projetadas para dar suporte a estudos associados com a conexão de geração distribuída na rede de distribuição. Algumas das ferramentas e modelos de análise disponíveis no *OpenDSS* são: representação da rede em coordenadas de fase, simulação estática (patamar de carga simples) e cronológica (considerando curva de carga), representação de dispositivos de controle da rede de distribuição (por exemplo, reguladores de tensão), análise de faltas (curto-circuito) e cálculo de harmônicos. Todas informações referentes ao software estão disponíveis no link: <http://smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx>.

1.5.1. Histórico do software *OpenDSS*

O desenvolvimento do *Distribution System Simulator* (“DSS”) tem início no ano de 1997 na Electroteck Concepts, Inc. pela parceria entre os pesquisadores e engenheiros eletricitas Roger Dugan e Thomas McDemontt. Em um primeiro momento o software havia sido desenvolvido para dar apoio as pesquisas relacionadas as análises de redes com a presença de GD devido a sua flexibilidade e a capacidade de realizar análises que outras ferramentas não ofereciam suporte para realizar e ter um desenvolvimento constante com o objetivo de criar soluções para novos desafios relativos aos sistemas de distribuição. No ano de 2004, o DSS foi comprado pelo *Electric Power Research Institute* (“EPRI”) e, em 2008, o EPRI

apresentou o software sob licença de código aberto e então ele passou a ser chamado de *OpenDSS*, a fim de contribuir na área de *Redes Elétricas Inteligentes* (DUGAN, 2013).

1.5.2. Estrutura do software *OpenDSS*

O software *OpenDSS* é um programa que faz usos de linhas de comando para a realização dos cadastros de dados, geração de relatórios, escolha de métodos de resolução, entre outros; sua estrutura está demonstrada na Figura 19. As linhas de comando podem ser escritas pelo usuário ou ter origem através de outros softwares. A interface COM oferece acesso a algumas funções bem como acesso a solução de banco de dados em estudos. Uma outra característica da estrutura do *OpenDSS* é que ele permite que desenvolvedores de softwares possam customizar o programa criando suas próprias DLL (DUGAN; MCDERMOTT, 2011).

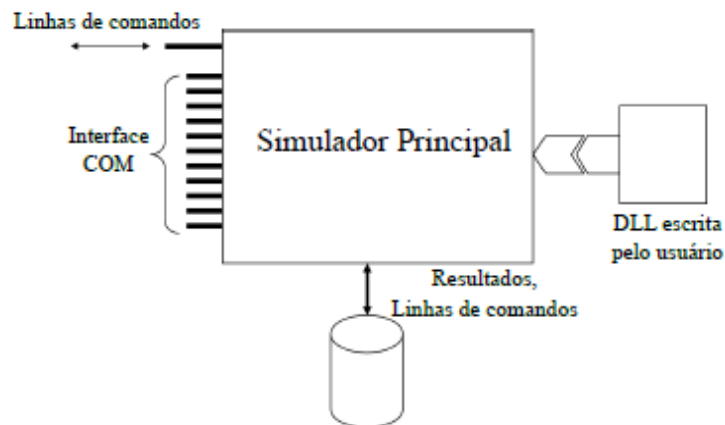


Figura 19: Estrutura do software *OpenDSS*

A execução e os modelos de circuito do *OpenDSS* são atualmente escritos em linguagem de programação Delphi que combina com a programação orientada a objeto com Pascal com rápido desenvolvimento de aplicativos para a plataforma Windows. Uma das razões para escolher Delphi foi a facilidade que a linguagem oferece para a implementação da interface COM. Para a matriz impedância do sistema e matrizes associadas são usados solucionadores de espaçamento implementados em DLL.

1.5.3. Modelos Básicos do *OpenDSS*

Segundo SEXAUER (2012), o *OpenDSS* modela os seus sistemas elétricos para simulações na condição de regime permanente senoidal (RPS), ou seja, consiste em uma ferramenta de cálculo algébrico, no domínio fasorial.

Para a construção de um circuito no *OpenDSS* existem dois blocos básicos. Os elementos de transporte (*Power Delivery-PD*) compõem o primeiro bloco e os elementos de conversão de energia compõem o segundo bloco (*Power Conversion-PC*). Linhas, transformadores e capacitores são elementos presentes no bloco dos PDs; e como exemplo de elementos do bloco dos PCs têm-se as cargas e os geradores. Os elementos de controle e medição, como curvas de carga, são chamados elementos de suporte e podem ser criados com a finalidade de refinar os modelos de PDs e PCs.

Para conectar os elementos elétricos, são usadas barras que contêm nós. Diferentemente da maioria dos softwares que realizam simulações de sistemas de distribuição de energia elétrica, no *OpenDSS* as barras são criadas como um resultado da criação de um elemento. Sendo assim, essa é uma mudança de paradigma, já que na maioria dos softwares a barra é o elemento central.

1.5.3.1. Barra

Como citado anteriormente, a barra é um elemento que contém nós, da maneira apresentada na Figura 20. A principal função desse elemento é conectar em seus nós os terminais dos elementos elétricos, que podem ser os PDs ou os PCs. Em toda barra será encontrado o nó de referência, o nó 0, que possui tensão nula.



Figura 20: Barra com N nós

1.5.3.2. Terminal

Todo elemento elétrico possui um ou mais terminais que podem conter diversos conectores. Cada terminal deve estar conectado em apenas uma barra. A Figura 21 apresenta um elemento com um terminal e N conectores.

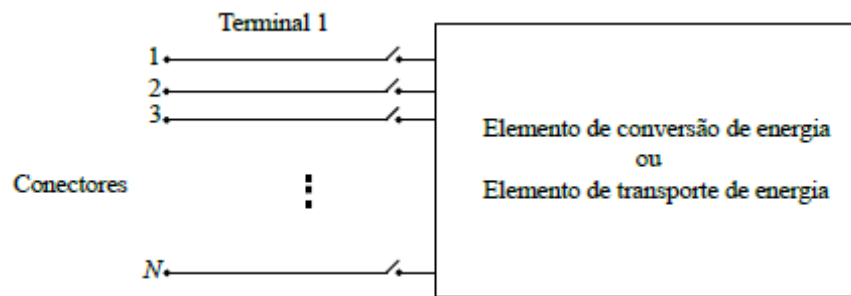


Figura 21: Terminal com N conectores

1.5.3.3. Elementos de Transporte de Energia (PD)

Os elementos que possuem a função de transporte de energia, Figura 22, possuem um ou mais terminais, como exemplo:

- Uma linha à 4 fios apresenta dois terminais com 4 conectores cada;
- Um transformador monofásico de três enrolamentos apresenta 3 terminais com 2 conectores cada;
- Um banco de capacitores trifásico apresenta apenas um terminal com 3 conectores.

Os transportadores de energia tem como função básica levar energia de um ponto a outro. Esses elementos são caracterizados pela sua matriz de admitância nodal.

Apesar de serem designados como elementos transportadores de energia, os bancos capacitores de energia e reatores, estão conectados em shunt, sendo assim a ideia de transportar energia não é válida para eles.

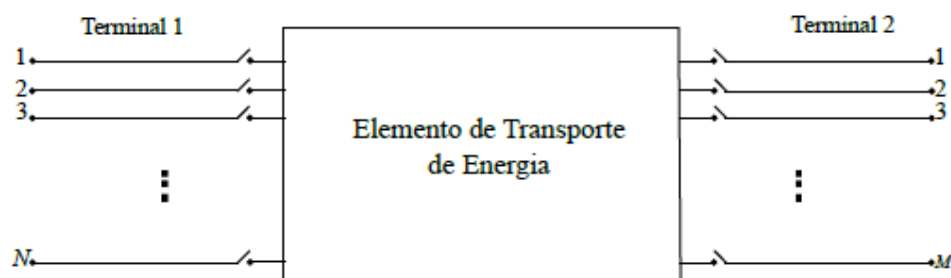


Figura 22: Elemento de transporte de energia com dois terminais, o primeiro com N conectores e o segundo com M conectores

1.5.3.4. Elementos de Conversão de Energia

Os elementos de conversão de energia convertem energia elétrica para outra forma de energia, ou vice-versa. Geradores, cargas, acumuladores de energia, todos, são exemplos de conversores de energia. Esses elementos possuem apenas um terminal que pode possuir N conectores, conforme Figura 23.

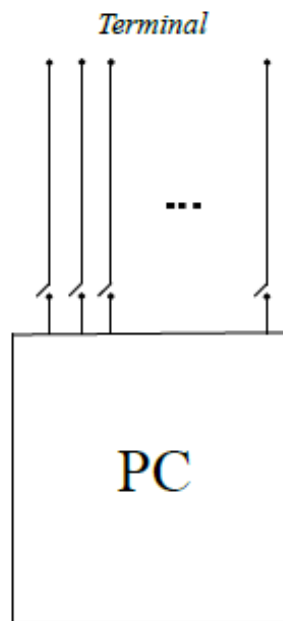


Figura 23: Elemento de conversão de energia

1.5.3.5. Elementos de Suporte

Os elementos de suporte tem a finalidade de oferecer as possibilidade de: facilitar a definição de parâmetros tanto para os PDs quanto para os PCs; associar funcionalidades de controle à alguns elementos; monitorar ou fornecer dados para as análises temporais.

A seguir estão os principais elementos de suporte oferecidos pelo *OpenDSS*:

- *LineCode*: elemento que oferece ao usuário a possibilidade de poder armazenar as características de uma linha;
- *LineGeometry* e *WireData*: elemento que oferece ao usuário a possibilidade de armazenar dados da geometria dos postes e das linhas;
- *LoadShape*: elemento que oferece ao usuário a possibilidade de criar uma curva de geração ou consumo em um determinado intervalo de tempo;

- *Spectrum*: elemento que inclui um espectro harmônico a um elemento de conversão de energia;
- *EnergyMeter*: elemento de suporte que corresponde a um medidor que fornece diversos resultados sobre a sua área de medição;
- *Monitor*: elemento que apresenta ao usuário os dados obtidos da rede de acordo com o ponto escolhido para sua alocação;
- *CapControl*: elemento que oferece a possibilidade do usuário realizar o controle do elemento capacitor;
- *RegControl*: assim como o *CapControl* tem a função de oferecer o controle do capacitor, o *RegControl* tem o objetivo de realizar o controle dos taps de um transformador.

1.5.4. O *OpenDSS* Standalone e sua Interface

Segundo SEXAUER (2012), o *OpenDSS* Standalone é apresentado como uma Graphical User Interface (GUI) que proporciona um ambiente estruturado para a criação e análise de sistemas elétricos.

A criação de sistemas elétricos nessa GUI deve ser realizada utilizando linhas de comando seguindo a linguagem de programação do *OpenDSS*. Esses comandos são documentados em detalhes no Manual do *OpenDSS*. Todos os comandos executados pela GUI possuem um comando correspondente na linguagem de programação do *OpenDSS*. Esses comandos podem ser verificados através da Ajuda do *OpenDSS* (*Help* → *OpenDSS Help*) ou através da ferramenta de gravação de comandos (*Edit* → *Record Script*). Quando ativada, qualquer funcionalidade executada pelo usuário através da GUI é adicionada ao final do código da janela selecionada e no correspondente formato na linguagem de programação do *OpenDSS*.

Para executar linhas ou fragmentos de linhas de comandos são necessários seguir os seguintes passos:

1° Passo: Selecione a linha ou as linhas que se deseja rodar.

2° Passo: Clique com o botão direito do mouse e selecione *Do Selected* ou a tecla de atalho *Ctrl+D*. (A seleção também pode ser executada a partir do menu “Do” ou diretamente através do botão abaixo do menu “*Edit*”).

Os resultados das simulações são fornecidos por meio de arquivos *.csv ou *.txt. O *OpenDSS* gera alguns relatórios de resultados padrões (ver o menu *Show* e o menu *Export*). Caso o usuário deseje relatórios mais sofisticados, é imprescindível a utilização da interface *COM*.

1.5.4.1. Utilizando a GUI do *OpenDSS*

Ao abrir o *OpenDSS*, o usuário encontra a janela da Figura 24.

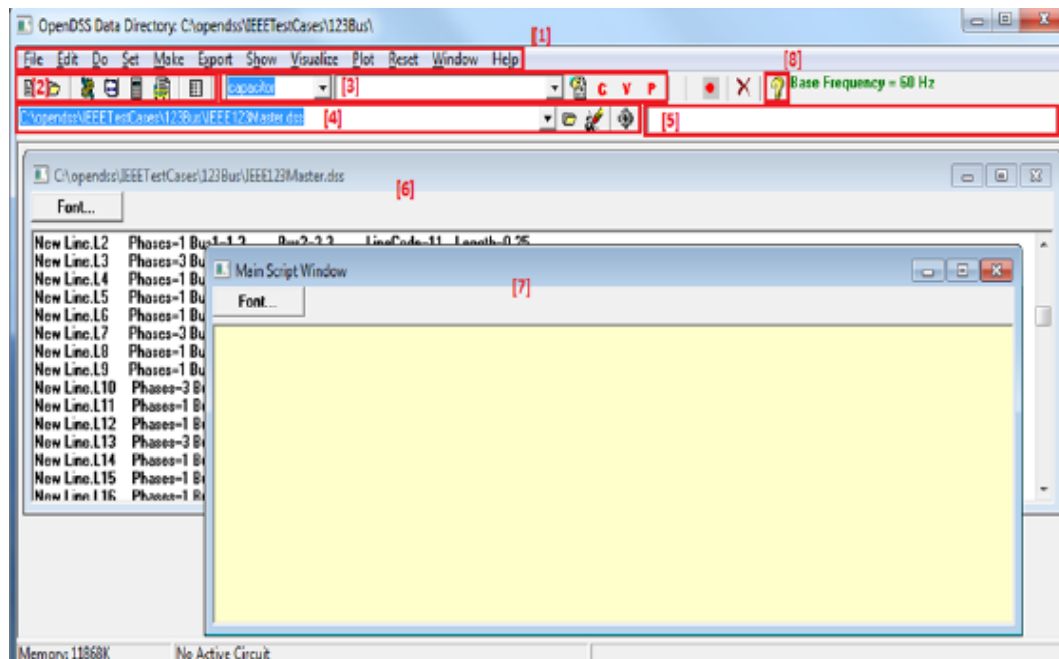


Figura 24: Interface do *OpenDSS*

Os componentes da interface são:

1. Estrutura do Menu:
 - Menu *Set*: Permite que se defina qualquer parâmetro de solução;
 - Menu *Export*: Permite salvar diversos relatórios de resultados no formato *.csv;
 - Menu *Show*: Abre o relatório escolhido no editor de texto selecionado;
 - Menu *Visualize*: Fornece o diagrama do elemento selecionado com a grandeza elétrica escolhida;
 - Menu *Plot*: Fornece diversos gráficos do sistema elétrico em análise.
2. Barra de ferramentas: Fornece acesso direto a alguns comandos importantes do *OpenDSS* como, por exemplo, *Solve*, *Summary* e *Do Selected*.
3. Ferramenta de elementos: Permite que o usuário selecione um tipo de elemento com o objetivo de editá-lo ou exibi-lo.

4. Ferramenta de *Script*: Permite que o usuário escolha qual das janelas abertas deverá ser simulada.

5. Barra de resultados: Proporciona uma versão condensada da janela de resultados, que pode ser acessada através de *Show* → *Results Form*.

6. Janela de *Script* Principal: É uma espécie de bloco de anotações ou janela interativa do *OpenDSS Standalone* que possibilita ao usuário digitar linhas de comando e executa-las através do atalho *Ctrl+D*. Entretanto, essa janela não pode ser fechada. O seu conteúdo é mantido mesmo após o fechamento do software.

7. Janela de *Scripts*: Tem as mesmas funcionalidades da Janela de *Script* Principal, porém pode ser fechada. Portanto, a inclusão de novas janelas possibilita a edição de arquivos DSS simultaneamente e a sua exceção individual através do atalho *Ctrl+D*.

8. Botão de ajuda: Ajuda o usuário a encontrar os comandos e as suas correspondentes descrições.

1.5.5. A linguagem de programação do *OpenDSS*

Segundo SEXAUER (2012), a descrição dos circuitos e a sua resolução são realizados através de linhas de comando respeitando a linguagem de programação do *OpenDSS*. Esse conjunto de linhas de comandos podem ser processados pelo *OpenDSS* de 3 formas ou a combinação dessas:

1. Circuito descrito na Janela de *Script* da *GUI* do *OpenDSS Standalone*.
2. Circuito descrito através da interface *COM*.
3. Circuito descrito em um arquivo *DSS* externo.

Essas características fazem do *OpenDSS* uma ferramenta facilmente acessível para usuários que querem realizar um rápido estudo em um circuito bem como para aqueles que querem realizar estudos mais complexos. Além disso, o *OpenDSS* facilita a utilização de diferentes bancos de dados, ou seja, não há necessidade de se conhecer um banco de dados específico.

1.5.5.1. Sintaxe da linguagem de programação do *OpenDSS*

Cada comando corresponde a uma linha de texto. Via de regra, cada comando apresenta um Verbo e alguns Parâmetros.

Existem dois tipos de linhas de comando. A primeira corresponde àquela em que o verbo interage diretamente com um elemento de circuito como, por exemplo:

```
Verbo Comando ClasseElemento.NomeElemento Param1=Valor1 Param2=Valor2
New Line.Linha Phases=3 Bus1=A Bus2=B length=1 units=km
linecode=ArranjoTeste
```

Figura 25: Exemplo de linha de comando com verbo interagindo

O segundo tipo de linha de comando corresponde àquela em que o verbo não interage com um exemplo, por exemplo:

```
Verbo Comando Param1=Valor1 Param2=Valor2
Set mode=daily stepsize=1h number=24
```

Figura 26: Exemplo de linha de comando sem interação com o verbo

1.5.5.2. Verbo

A Tabela 1 apresenta os verbos mais comuns. Caso nenhum verbo seja especificado, o verbo *Edit* é utilizado.

Tabela 1: Principais Verbos

Verbo	Descrição
<i>New</i>	Cria um novo elemento
<i>Edit</i>	Edita um documento de circuito escolhido
<i>Set</i>	Define as opções de solução como, por exemplo, Mode
<i>Solve</i>	Realização a solução do circuito definido
<i>Show</i>	Apresenta relatórios de resultados em arquivos *.txt
<i>Export</i>	Salva relatórios de resultados em arquivo *.csv
<i>Plot</i>	Plota os resultados do fluxo de potência no circuito

1.5.5.3. Parâmetros

Os pares parâmetro/valor podem ser separados através de vírgula ou de espaço em branco. Para valores que requerem delimitadores, podem ser utilizados ou apresentados na Tabela 2. Embora esses delimitadores sejam intercambiáveis, é sugerido seguir um padrão para uma melhor estética.

Para o acesso a um membro de uma classe ou um parâmetro (propriedade) de um elemento é utilizado o símbolo de ponto final (.). Todos os elementos devem ser especificados através de seu nome completo, a menos que o contexto deixe claro qual é o elemento. Por exemplo, quando especificamos um elemento *CapControl*, o elemento não precisa ser incluído, ou seja, se o capacitor *Capacitor.Cap1* deve ser controlado por um elemento *CapControl*, na descrição do elemento *CapControl* deve-se especificar apenas *Cap1*, isto é, *capacitor = Cap1*.

Tabela 2: Delimitadores da linguagem de programação do OpenDSS

Delimitador	Sugestão de Uso
Aspas Simples	String
Aspas Duplas	String
Parênteses	Lista de Valores
Colchetes	Lista de Valores
Chaves	Expressão Matemática

O nome completo de um elemento possui o seguinte formato:

```
ClasseElemento.NomeElemento
Line.Linha
```

Figura 27: Formato de nome do elemento

Para acessar uma propriedade de um elemento, o seguinte formato deve ser utilizado:

```
ClasseElemento.NomeElemento.PropriedadeNome
Line.Linha.Phases
```

Figura 28: Formato para acessar propriedade de elemento

Ao acessar múltiplos parâmetros do mesmo elemento dentro do mesmo comando, os nomes de propriedades adicionais não precisam ser descritos por completo. Por exemplo:

```
Line.L1.Bus1=1, Bus2=5
```

Figura 29: Formato para acessar múltiplos parâmetros de um elemento

Além disso, os parâmetros também podem ser especificados na sua ordem padrão. Isso é comumente feito quando se especifica a propriedade elemento ou objeto, pois geralmente essas propriedades são as primeiras a serem descritas. Por fim, a especificação pela ordem e pelo par parâmetro/valor podem ser misturadas, como mostrado abaixo:

```
New EnergyMeter.Feeder Line.L115, terminal=1, enabled=false
```

Figura 30: Formato padrão para especificação de parâmetros

Ao especificar um novo dispositivo, à muitos dos seus parâmetros são dados valores razoáveis. A documentação completa sobre quais parâmetros devem ser especificados, quais parâmetros recebem possuem/valores padrões (*default*) e quais são esses valores é fornecida na documentação dos comandos.

Em geral, classes de elementos que possuem/valores padrões (*default*) e quais são esses valores é fornecida na documentação dos comandos.

Em geral, classes de elementos que possuem as propriedades *element*, *object*, *terminal*, *bus1* ou *bus2* não possuem valores padrão e deve ser especificados no instante da criação do dispositivo.

1.5.5.4. Comentários

Comentários podem ser adicionados às linhas de comando utilizando os símbolos (//) ou (!). Conforme o exemplo a seguir:

```
// Editar o Controle do Regulador de tensão chamado ControleRegulador
RegControl.ControleRegulador.Maxtapchange=1 ! Limite para mudança de um tap
```

Figura 31: Formato para tornar as linhas de comando como comentários

```

/* Comentando um trecho do código
New monitor.FontePQ Vsource.Fonte 1 mode=1 ppolar=no
New monitor.FonteVI Vsource.Fonte 1 mode=0 Vlpolar=Yes

```

Figura 32: Formato para tornar múltiplas linhas de comando como comentários

Para inserir comentários em múltiplas linhas é necessário utilizar (*/* ... /**).

1.5.5.5. Multi Linhas

Se um comando precisar de mais de uma linha, o símbolo (~) deve ser utilizado no começo das linhas adicionais, conforme apresentado a seguir:

```

New Line.L1 Bus1=1, Bus2=2, Length=1
~ units=mi, geometry=3PH_3/0_Horiz

```

Figura 33: Formato para o caso com mais de uma linha para adicionar parâmetros

Observe que, na realidade, o código acima consiste em dois comandos separados. Como tal, todos os parâmetros não-padrão devem ser definidos na primeira linha de comando. Caso contrário o *OpenDSS* acusará um erro de sintaxe, como no caso a seguir:

```

// O OpenDSS acusará um erro pois as barras Bus1 e Bus2 não são definidas na
primeira linha
New Line.L1, Length=1, units=mi
~ Bus1=1, Bus2=2 geometry=3PH_3/0_Horiz

```

Figura 34: Formato para o caso em que o *OpenDSS* acusará um erro porque as barras 1 e 2 não estão na primeira linha

Há duas maneiras de incluir arquivos DSS externos dentro do código analisado pelo *OpenDSS*:

1. Comando Compile: Esse comando aciona no código analisado o arquivo selecionado, entretanto o diretório onde os resultados são salvos é alterado para o diretório no qual o arquivo escolhido pelo comando Compile está salvo.

2. Comando Redirect: Esse comando adiciona no código analisado o arquivo selecionado, entretanto, diferentemente do comando Compile, o diretório continua sendo o arquivo analisado.

Além disso, algumas propriedades como, por exemplo, *mult* presente na classe *LoadShape*, pode exigir uma lista imensa de valores. Por esse motivo, o *OpenDSS* possibilita a leitura desses valores em arquivos externos que podem estar em formato **.txt* ou **csv*. Segue exemplo:

```
LoadShape.LS1 mult=(File="Example.csv")
```

Figura 35: Formato para acessar arquivo externo .csv

1.6. MOTIVAÇÃO

A partir do início do século XXI o Brasil presenciou um avanço muito grande no acesso à energia elétrica, o que muito se deve a programas do governo como o PLPT (Programa Luz para Todos) e a privatização da maioria das distribuidoras de energia elétrica do Brasil. A melhora nos índices sociais também fez que vários brasileiros subissem nos extratos sociais e assim puderam ter acesso a opções de eletrodomésticos de lazer, bem como eletrodomésticos da linha branca, antes não acessíveis, como, geladeira, máquina de lavar roupa, micro-ondas, entre outros. Todo esse avanço refletiu na maneira como o brasileiro se relaciona com o consumo de energia elétrica, antes, um privilégio dos centros das áreas urbanas, uma vez que ficavam excluídas as áreas rurais e a margem dos centros.

Toda essa revolução que aconteceu na primeira década deste século fez com que os órgãos reguladores, empresas de distribuição de energia elétrica e consumidores, se preocupassem cada vez mais com a qualidade do serviço. Neste período as distribuidoras alavancaram seus investimentos tanto para expansão quanto para manutenção das redes de distribuição de energia elétrica.

A segunda década está trazendo outros desafios que partem da segurança do atendimento as cargas, para isso, os investimentos estão migrando da expansão e manutenção para a automação das redes de distribuição com a implantação de religadores, chaves telecomandadas, bancos de capacitores automatizados, subestações operadas por centros de supervisionamento, entre outros avanços. Toda essa revolução que junta os investimentos na automação, a melhoria das topologias de comunicação, o uso de energia limpa e renovável, fazem parte de um grande conceito que são as *Redes Elétricas Inteligentes*.

Apesar da demora, atualmente no Brasil tem aumentado o uso de pequenos geradores de energia renováveis alocados próximos aos centros de consumo, devido à grande diversidade da matriz energética brasileira. O Brasil também está avanço no que se trata da regulamentação da conexão de micro e mini geração no nível do consumidor podendo dessa forma haver uma compensação na tarifa de consumo. A ANEEL através da Resolução Normativa ANEEL nº482/2012:

[...] o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade. Os estímulos à geração distribuída se justificam pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Entre eles, estão o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética. (BRASIL, 2015).

Toda inserção de novos elementos, configurações, entre outras mudanças; faz com que a relação entre distribuidora e consumidor mude, onde antes um dependia do outro, agora, pode-se ter uma relação mais justa.

Com toda essa revolução em curso, as distribuidoras e pesquisadores da área, precisam de softwares que possuam ferramentas para análise considerando todas essas variáveis introduzidas no sistema de distribuição de energia elétrica de forma que possam ser obtidas respostas precisas e rápidas para a solução dos problemas e desafios que serão apresentados pelo sistema.

O *OpenDSS* se apresenta como um software altamente capaz de atender os requisitos exigidos para a atual configuração do sistema bem como futuras necessidades, já que se trata de um software poderosíssimo que possui ferramentas que oferecem soluções para a maioria dos estudos, se destacando em análise de geração distribuída.

1.7.OBJETIVO

O objetivo geral desta monografia é desenvolver um tutorial para utilização do software *OpenDSS* na análise de redes de distribuição de energia elétrica. Serão desenvolvidos sistemas-teste para aplicação do software, aplicação para a análise de faltas, cálculo do fluxo de potência, estudos dos principais modelos para a representação de componentes da rede de distribuição em coordenadas de fase e por

fim um estudo sobre a utilização do software *OpenDSS* em ambiente *MatLab*. O presente trabalho também tem a intenção de apresentar o software a comunidade acadêmica, oferecendo base para trabalhos futuros.

1.8. ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

O presente trabalho está dividido da seguinte forma:

No Capítulo 1, serão apresentados aspectos sobre os tipos de redes distribuição de energia elétrica (alta tensão, média tensão e baixa tensão), oferecendo um conhecimento geral sobre os objetivos de cada uma, suas topologias, sua relação com o consumidor final, entre outros. Haverá também neste capítulo uma abordagem geral em torno do estudo de fluxo de potência e curto-circuito, que são os estudos típicos realizados em redes de distribuição. O trabalho apresenta também no capítulo 1, uma apresentação dos principais softwares utilizados na análise de redes de distribuição, como o *CYMDIST* e *WindMil* que são softwares comerciais e os de código aberto, *GridLabd* e *OpenDSS*, este último objetivo de estudo da monografia. Uma introdução a respeito do *OpenDSS* é apresentada no Capítulo 1, onde há uma abordagem sobre o seu histórico, apresentando seus fundadores e os objetivos para o qual foi desenvolvido, na introdução sobre o *OpenDSS* são apresentados os principais modelos existentes e como cada componente se comporta no desenvolvimento de um projeto, apresenta-se a estrutura do software bem como é apresentado também a sintaxe da linguagem de programação do *OpenDSS*. Logo em seguida haverá a motivação que levou a realização do trabalho e em seguida os objetivos a serem alcançados.

No Capítulo 2 é apresentado um estudo em torno dos modelos dos principais componentes na análise de uma rede de distribuição de energia elétrica, que são: linhas, transformadores e cargas.

No Capítulo 3 será desenvolvida uma análise de como o *OpenDSS* trabalha na solução de fluxo de potência, apresentado os tipos de solução, bem como os algoritmos internos do programa. O capítulo apresenta também a maneira como o *OpenDSS* realiza os estudos de curto-circuito, apresentando os modos de operação, como cada modo se comporta e como inicializar cada um deles.

No capítulo 4 será explanado a maneira como o usuário pode utilizar o software *OpenDSS* no ambiente do *MATLAB*.

A seguir no capítulo 5 haverá um explicação de quais são as maneiras que o software *OpenDSS* oferece para a visualização dos resultados e como obter os relatórios de resultados.

No capítulo 6 onde estão presentes as simulações realizadas para os estudos de fluxo de potência e curto-circuito.

O capítulo 7 apresenta uma conclusão para o trabalho baseado na experiência com o software *OpenDSS*.

Ao final da monografia encontram-se as referências bibliográficas usadas no decorrer do trabalho.

2. MODELAGEM DE COMPONENTES DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO PARA ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA E CURTO-CIRCUITO

2.1. MODELOS DE LINHAS

2.1.1. Modelo exato de um segmento de linha

Segundo KERSTING (2012), o modelo exato de um linha trifásica, bifásica ou monofásica sendo ela aérea ou subterrânea está mostrando na Figura 36.

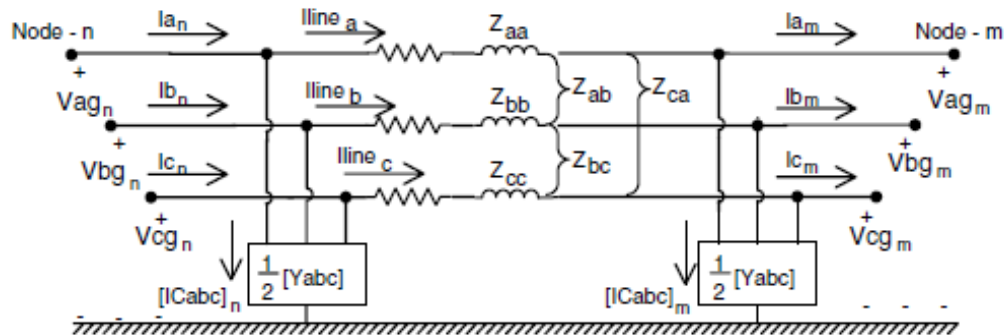


Figura 36: Modelo de segmento de linha trifásica

Para o caso em que o segmento de linha é bifásico ou trifásico, alguns dos valores de impedâncias e admitâncias, da Figura 36, será igual a zero. Para esse segmento de linha, as equações que relacionam as tensões e correntes na entrada (nó n) com as tensões e correntes na saída (nó m) estão demonstradas a seguir.

Aplicando a Lei das Correntes de *Kirchhoff* no nó m:

$$\begin{bmatrix} I_{line_a} \\ I_{line_b} \\ I_{line_c} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_m + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m \quad (7)$$

A equação (7) pode ser representada na forma condensada da seguinte maneira:

$$[I_{line_{abc}}]_n = [I_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [VLG_{abc}]_m \quad (8)$$

Aplicando a Lei das Tensões de *Kirchhoff* no modelo resulta em:

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Y_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{line_a} \\ I_{line_b} \\ I_{line_c} \end{bmatrix}_m \quad (9)$$

Na forma condensada a equação (9) torna-se:

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}][I_{line_{abc}}]_m \quad (10)$$

Substituindo a equação (8) na equação (10):

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] \left\{ [I_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [VLG_{abc}]_m \right\} \quad (11)$$

Coletando os termos:

$$[VLG_{abc}]_n = \left\{ [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}][Y_{abc}] \right\} * [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] * [I_{abc}]_m \quad (12)$$

Onde:

$$[U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

A equação (12) na forma geral pode ser escrita da seguinte forma:

$$[VLG_{abc}]_n = [a][VLG_{abc}]_m + [b][I_{abc}]_m \quad (14)$$

Onde:

$$[a] = [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}][Y_{abc}] \quad (15)$$

$$[b] = [Z_{abc}] \quad (16)$$

A corrente de entrada no segmento de linha no nó n é:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} Iline_a \\ Iline_b \\ Iline_c \end{bmatrix}_m + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n \quad (17)$$

Na forma condensada:

$$[I_{abc}]_n = [Iline_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [VLG_{abc}]_n \quad (18)$$

Substituindo a equação (8) na equação (18):

$$[I_{abc}]_n = [I_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [VLG_{ac}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [VLG_{abc}]_n \quad (19)$$

Substituindo a equação (12) na equação (19):

$$[I_{abc}]_n = [I_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [VLG_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] \left(\{ [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}] [Y_{abc}] \} [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] [I_{abc}]_m \right) \quad (20)$$

Coletando os termos da equação (20):

$$[I_{abc}]_n = \left\{ [Y_{abc}] + \frac{1}{4} [Y_{abc}] [Z_{abc}] [Y_{abc}] \right\} [VLG_{abc}]_m + \left\{ [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}] [Y_{abc}] \right\} [I_{abc}]_m \quad (21)$$

A equação (21) pode ser escrita na forma:

$$[I_{abc}]_n = [c] [VLG_{abc}]_m + [d] [I_{abc}]_m \quad (22)$$

Onde:

$$[c] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4} [Y_{abc}] [Z_{abc}] [Y_{abc}] \quad (23)$$

$$[d] = [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}] [Y_{abc}] \quad (24)$$

As equações (14) e (22) podem se colocadas na forma de matriz particionada:

$$\begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_n \\ [I_{abc}]_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a] & [b] \\ [c] & [d] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_m \\ [I_{abc}]_m \end{bmatrix} \quad (25)$$

A equação (25) pode ser montada para resolver as tensões e correntes no nó m em termos das tensões e correntes no nó n .

$$\begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_m \\ [I_{abc}]_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a] & [b] \\ [c] & [d] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_n \\ [I_{abc}]_n \end{bmatrix} \quad (26)$$

A inversa da matriz $abcd$ é simples porque o determinante é:

$$[a][d] - [b][c] = [U] \quad (27)$$

Usando a relação da equação (27), a equação (26) torna-se:

$$\begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_m \\ [I_{abc}]_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [d] & -[b] \\ -[c] & [a] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_n \\ [I_{abc}]_n \end{bmatrix} \quad (28)$$

Como a matriz $[a]$ é igual a matriz $[d]$, a equação (28) pode ser expandida da seguinte forma:

$$[VLG_{abc}]_m = [a][VLG_{abc}]_n - [b][I_{abc}]_n \quad (29)$$

$$[I_{abc}]_n = -[c][VLG_{abc}]_n + [d][I_{abc}]_n \quad (30)$$

Às vezes é preciso calcular as tensões no nó m como funções das tensões no nó n e das correntes entrando no nó m .

Resolvendo a equação (14) para as tensões na barra m , tem-se:

$$[VLG_{abc}]_m = [a]^{-1} \{ [VLG_{abc}]_n - [b][I_{abc}]_m \} \quad (31)$$

A equação (31) pode ser escrita na forma:

$$[VLG_{abc}]_m = [A][VLG_{abc}]_n - [B][I_{abc}]_m \quad (32)$$

Onde:

$$[A] = [a]^{-1} \quad (33)$$

$$[B] = [a]^{-1}[b] \quad (34)$$

As tensões de linha são calculadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m = [D][VLG_{abc}]_m \quad (34)$$

Onde:

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

2.1.2. O modelo de linha modificada

A Figura 37 mostra o modelo para um segmento de linha modificado com admitâncias shunt negligenciada.

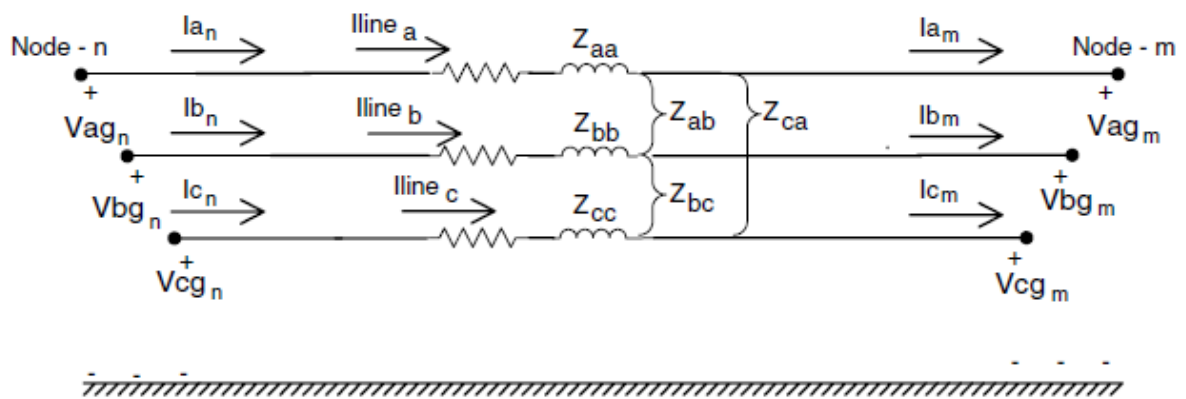


Figura 37: Modelo de segmento de linha modificado

2.1.2.1. Linha à 3 fios em delta

Segundo KERSTING (2012), se a linha é à 3 fios em delta, então a queda de tensão da linha deve estar em termos das tensões de linha e correntes de linha. Entretanto, é possível usar tensões de fase equivalentes de modo que as equações derivadas para este ponto ainda se apliquem. Escrevendo as tensões de linha para a linha da Figura 37:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} vdrop_a \\ vdrop_b \\ vdrop_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} vdrop_b \\ vdrop_c \\ vdrop_a \end{bmatrix} \quad (36)$$

Onde:

$$\begin{bmatrix} vdrop_a \\ vdrop_b \\ vdrop_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Iline_a \\ Iline_b \\ Iline_c \end{bmatrix} \quad (37)$$

Expandindo a equação (36) para a fase a-b:

$$Vab_n = Vab_m + vdrop_a - vdrop_b \quad (38)$$

Porém:

$$ab_n = Van_n - Vbn_n \quad (39)$$

$$Vab_m = Van_m - Vbn_m \quad (40)$$

Substituindo as equações (39) e (40) na equação (38):

$$Van_n - Vbn_n = Van_m - Vbn_m + vdrop_a - vdrop_b \quad (40)$$

A equação (34) pode ser dividida em duas partes em termos das tensões de fase equivalentes.

$$Van_n = Van_m + vdrop_a \quad (41)$$

$$Vbn_n = Vbn_m + vdrop_b \quad (42)$$

Sendo assim, pode-se afirmar ser possível trabalhar com tensões equivalentes de fase em uma linha à 3 fios em delta.

2.1.2.2. O cálculo das correntes de neutro e terra

Segundo KERSTING (2012), o cálculo das correntes de neutro e terra pode ser feito através matriz de transformação do neutro, mostrada na equação (43).

$$[t_n] = -[\hat{z}_{nm}]^{-1} [\hat{z}_{nj}] \quad (43)$$

As matrizes $[\hat{z}_{nm}]$ e $[\hat{z}_{nj}]$ são matrizes particionadas na matriz de impedância primitiva.

Quando as correntes que fluem nas linhas forem determinadas, a equação (44) é usada para calcular as correntes fluindo no cabo de neutro aterrado.

$$[I_n] = [t_n][I_{abc}] \quad (44)$$

Na equação (44), a matrix I_n para uma linha aérea com um condutor neutro vai possuir apenas um elemento. Entretanto, no caso em que a linha subterrânea é composta por fios de neutro concêntricos com ou sem um fio de neutro separado, $[I_n]$ será as correntes fluindo em cada cabo de neutro e fio de neutro separado, se houver. Um vez que as correntes de neutro foram determinadas, a lei das correntes de Kirchhoff é usada para calcular a corrente fluindo no terra.

$$I_g = -(I_a + I_b + I_c + I_{n1} + I_{n2} + \dots + I_{nk}) \quad (45)$$

2.1.2.3. Modelo aproximado de segmento de linha

Algumas vezes as únicas informações disponíveis para um segmento de linha serão as impedâncias de sequência positiva e zero. O método aproximado pode ser desenvolvido aplicando a transformação reversa de impedâncias da teoria de componentes simétricas (KERSTING, 2012).

Usando as impedâncias de sequência zero e positiva, a matriz de impedâncias de sequência é dada por:

$$[Z_{seq}] = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_+ & 0 \\ 0 & 0 & Z_+ \end{bmatrix} \quad (46)$$

Aplicando a teoria de componentes simétricas, tem-se a seguinte matriz de impedância de fase.

$$Z_{aprox} = [A_s][Z_{seq}][A_s]^{-1} \quad (47)$$

$$Z_{aprox} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} (2Z_+ + Z_0) & (Z_0 - Z_+) & (Z_0 - Z_+) \\ (Z_0 - Z_+) & (2Z_+ + Z_0) & (Z_0 - Z_+) \\ (Z_0 - Z_+) & (Z_0 - Z_+) & (2Z_+ + Z_0) \end{bmatrix} \quad (48)$$

É possível notar que matriz da equação (48) é caracterizada pelos três termos da diagonal principal iguais e todos termos mútuos iguais. Este é o mesmo resultado assumindo que a linha seja transposta. Aplicando a matriz de impedância aproximada no nó n :

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} (2Z_+ + Z_0) & (Z_0 - Z_+) & (Z_0 - Z_+) \\ (Z_0 - Z_+) & (2Z_+ + Z_0) & (Z_0 - Z_+) \\ (Z_0 - Z_+) & (Z_0 - Z_+) & (2Z_+ + Z_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_m \quad (49)$$

A forma condensada da equação (49):

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{aprox}][I_{abc}]_m \quad (50)$$

A equação (49) pode ser escrita na forma:

$$[VLG_{abc}]_n = [a][VLG_{abc}]_m + [b][I_{abc}]_m \quad (51)$$

Onde:

$[a]$ = matriz unitária

$[b]$ = $[Z_{aprox}]$

A equação (49) pode ser expandida e um circuito equivalente para o modelo aproximado de segmento de linha pode ser desenvolvido. Resolvendo a equação (49) para a tensão na fase a, b e c resulta em:

$$V_{ag_n} = a_{g_m} + Z_+ I_a + \frac{(Z_0 - Z_+)}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (52)$$

$$V_{bg_n} = V_{bg_m} + Z_+ I_b + \frac{(Z_0 - Z_+)}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (53)$$

$$V_{cg_n} = V_{cg_m} + Z_+ I_c + \frac{(Z_0 - Z_+)}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (54)$$

A Figura 38 ilustra um circuito equivalente simples para o segmento de linha, uma vez que não é necessário modelar o acoplamento mútuo. Deve ser entendido,

no entanto, que o circuito equivalente só pode ser usado quando a transposição do segmento de linha for assumida.

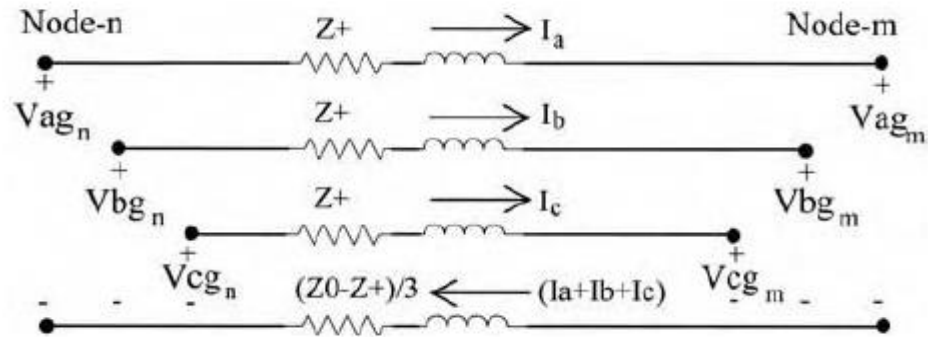


Figura 38: Modelo aproximado de segmento de linha

2.2. MODELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

2.2.1. Conexão abaixadora do tipo delta-estrela aterrado

Segundo KERSTING (2012), a conexão delta-estrela aterrado é comumente usada em subestações de distribuição servindo um alimentador de configuração estrela à 4 fios. Outra aplicação é suprir uma carga monofásica ligada em primário. Devido a conexão estrela, três fases monofásicas estão disponíveis, assim tornando possível balancear o carregamento monofásico do banco do transformador.

Três transformadores monofásicos podem ser conectados em delta-estrela aterrado de acordo com a configuração apresentada na Figura 39:

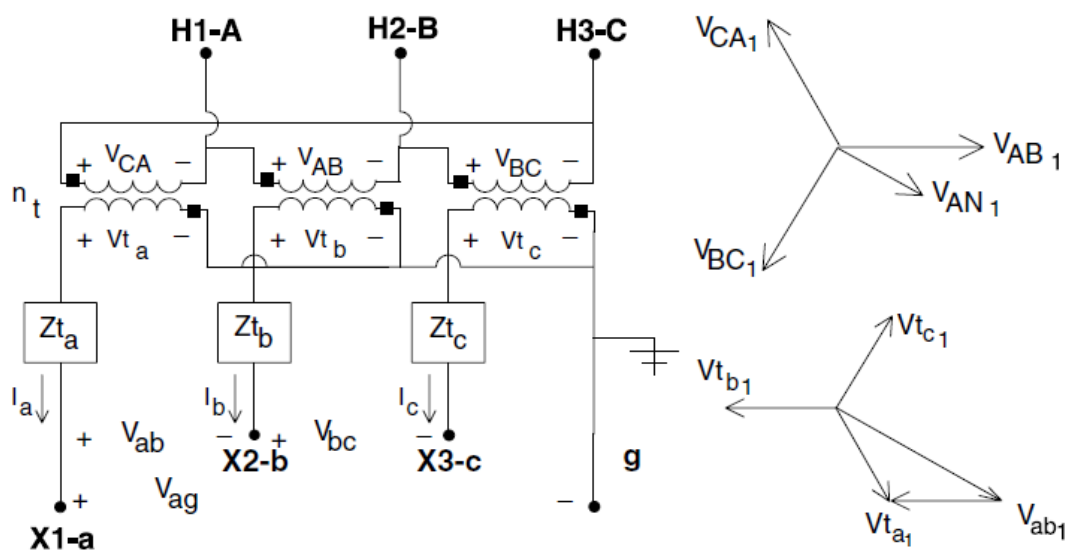


Figura 39: Conexão delta-estrela aterrado com as tensões demonstradas

2.2.1.1. Tensões

O diagrama de fases da sequência positiva das tensões demonstrado na Figura 38 mostra a relação entre as tensões de sequência positiva. Deve-se ter cuidado com as polaridades nos enrolamentos individuais do transformador. Observando as marcas de polaridade nos enrolamentos do transformador, a tensão Vt_a está defasada em 180° em relação a tensão V_{CA} e tensão Vt_b está defasada em 180° em relação a tensão V_{AB} . De acordo com a leis das tensões de *Kirchhoff* pode-se deduzir o valor da tensão de linha entre as fases a e b (KERSTING, 2012).

$$V_{ab} = Vt_a - Vt_b \quad (55)$$

Os fasores das tensões de sequência positiva da equação (55) estão mostrados na Figura 39.

A relação de transformação pode ser determinada da seguinte forma:

$$n_t = \frac{VLL_{rhs}}{VLN_{rls}} \quad (56)$$

Aplicando a equação (56), o valor da tensão de linha ideal para o transformador:

$$|VLL| = n_t |Vt| \quad (57)$$

A magnitude da tensão de fase de sequência positiva no lado de alta é dado por:

$$|VLN| = \frac{|VLL|}{\sqrt{3}} = \frac{n_t}{\sqrt{3}} |Vt| = a_x |Vt| \quad (58)$$

Onde:

$$a_x = \frac{VLL_{rhs}}{VLL_{rls}} \quad (59)$$

Em relação a Figura 39, a tensão de linha no lado do primário do transformador como uma função das tensões ideais no secundário é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -n_t & 0 \\ 0 & 0 & -n_t \\ -n_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vt_a \\ Vt_b \\ Vt_c \end{bmatrix} \quad (60)$$

Na forma condensada a equação (60) é igual à:

$$[VLL_{ABC}] = [AV][Vt_{ABC}] \quad (61)$$

Onde:

$$[AV] = \begin{bmatrix} 0 & -n_t & 0 \\ 0 & 0 & -n_t \\ -n_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (62)$$

As tensões de linha conhecidas são transformadas em tensões de sequência da seguinte maneira:

$$[VLL_{012}] = [A_s]^{-1}[VLL_{ABC}] \quad (63)$$

Onde:

$$[A_s] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s^2 & a_s \\ 1 & a_s & a_s^2 \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$a_s = 1.0 \angle 120^\circ \quad (65)$$

Pela definição, a tensão de sequência zero é sempre zero. A relação entre as tensões de fase e de linha de sequência positiva e negativa é conhecida. Estas relações em forma de matriz são dadas por:

$$\begin{bmatrix} VLN_0 \\ VLN_1 \\ VLN_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & t_s^* & 0 \\ 0 & 0 & t_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} VLL_0 \\ VLL_1 \\ VLL_2 \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$[VLN_{012}] = [T][VLL_{012}] \quad (67)$$

$$t_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \quad (68)$$

As tensões de fase equivalentes, como uma função das tensões de fase:

$$[VLN_{ABC}] = [A_s] [VLN_{012}] \quad (69)$$

Substituindo a equação (67) na equação (69):

$$[VLN_{ABC}] = [A_s][T][VLL_{012}] \quad (70)$$

Substituindo a equação (63) na equação (70):

$$[VLN_{ABC}] = [W][VLL_{ABC}] \quad (71)$$

Onde:

$$[W] = [A_s][T] [A_s]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (72)$$

A equação (72) fornece método para o cálculo das tensões de fase equivalente através das tensões de linha já conhecidas. Isso é uma importante relação que será usada de várias formas.

Substituindo a equação (61) na equação (72):

$$[VLN_{ABC}] = [W][AV][Vt_{abc}] = [VLN_{ABC}] = [a_t][Vt_{abc}] \quad (73)$$

Onde:

$$[a_t] = [W][AV] = \frac{-n_t}{3} \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (74)$$

A equação (74) define a matriz generalizada de $[a]$ para a conexão abaixadora do tipo delta-estrela aterrado.

As tensões ideais no secundário como função das tensões linha-terra no secundário e as correntes de linha no secundário são:

$$[Vt_{abc}] = [VLG_{abc}] + [Zt_{abc}][I_{abc}] \quad (75)$$

Onde:

$$[Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \quad (76)$$

Dá pra se notar que na equação (76) não há restrição para que as impedâncias dos três transformadores sejam iguais.

Substituindo a equação (75) na equação (73):

$$[VLN_{ABC}] = [a_t]([VLG_{abc}] + [Zt_{abc}][I_{abc}]) \quad (77)$$

$$[VLN_{ABC}] = [a_t]([VLG_{abc}] + [b_t][I_{abc}]) \quad (78)$$

Onde:

$$[b_t] = [a_t][Zt_{abc}] = \frac{-n_t}{3} \begin{bmatrix} 0 & 2Zt_b & Zt_c \\ Zt_a & 0 & 2Zt_c \\ 2Zt_a & Zt_b & 0 \end{bmatrix} \quad (79)$$

As matrizes generalizadas $[a]$ e $[b]$ já foram definidas. A derivação das matrizes generalizadas, $[A]$ e $[B]$ começa resolvendo a equação (61) para as tensões ideais no secundário.

$$[Vt_{abc}] = [AV]^{-1}[VLL_{ABC}] \quad (80)$$

As tensões de linha como funções das tensões equivalentes de fase são:

$$[VLL_{ABC}] = [D][VLN_{ABC}] \quad (81)$$

Onde:

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (82)$$

Substituindo a equação (81) na equação (80):

$$[Vt_{abc}] = [AV]^{-1}[D][VLN_{ABC}] = [A_t][VLN_{ABC}] \quad (83)$$

Onde:

$$[A_t] = [AV]^{-1}[D] = \frac{1}{-n_t} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (84)$$

Substituindo a equação (75) na equação (83):

$$[VLG_{abc}] + [Zt_{abc}][I_{abc}] = [A_t][VLN_{ABC}] \quad (85)$$

Rearranjando a equação (85):

$$[VLG_{abc}] = [A_t][VLN_{ABC}] - [B_t][I_{abc}] \quad (86)$$

Onde:

$$[B_t] = [Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \quad (87)$$

A equação (78) e a equação (86) são as equações generalizadas para as tensões de um transformador abaixador com conexão delta-estrela aterrado.

2.2.1.2. Correntes

A conexão de 30 graus especifica que as correntes de sequência positiva entrando no terminal H1 vai estar adiantada em relação a corrente de sequência positiva, que deixa o terminal X1, em 30 graus. A Figura 39 mostra a mesma conexão da Figura 38 mas agora as correntes estão sendo mostradas invés das tensões. Assim como nas tensões, as polaridades dos enrolamentos devem ser observadas também para as correntes. Por exemplo, na Figura 40, a corrente I_a está entrando na marca de polaridade do enrolamento de baixa tensão, então a corrente I_{AC} no enrolamento de alta tensão estará em fase com I_a . Essa relação está demonstrada no diagrama de fasores para correntes de sequência positiva da Figura 40 (KERSTING, 2012).

As correntes de linha podem ser determinadas como função das correntes em delta através da aplicação das Lei das Correntes de *Kirchhoff*:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{AC} \\ I_{BA} \\ I_{CB} \end{bmatrix} \quad (88)$$

Na forma condensada:

$$[I_{ABC}] = [DI][ID_{ABC}] \quad (89)$$

A matriz que relaciona as correntes em delta no primário com as correntes de linha no secundário é dada por:

$$\begin{bmatrix} I_{AC} \\ I_{BA} \\ I_{CB} \end{bmatrix} = \frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (90)$$

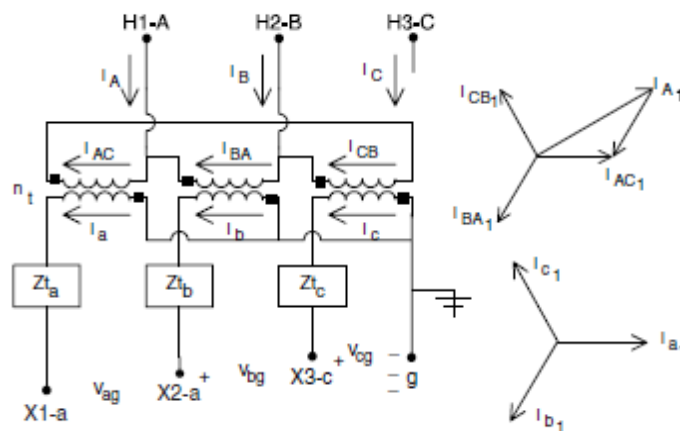


Figura 40: Conexão delta-estrela aterrado com as correntes demonstradas

$$[ID_{ABC}] = [AI][I_{abc}] \quad (91)$$

Substituindo a equação (91) na equação (89):

$$[I_{ABC}] = [D][AI][I_{abc}] = [c_t][VLG_{abc}] + [d_t][I_{abc}] \quad (92)$$

Onde:

$$[d_t] = [D][AI] = \frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (93)$$

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (94)$$

A equação 92 fornece o método direto para o cálculo das correntes de linha da fase no nó n conhecendo-se as correntes de linha no nó m .

2.2.2. Configuração abaixador do tipo estrela não aterrada-delta

Três transformadores monofásicos podem ser conectados em estrela-delta. O neutro do lado estrela pode ser aterrado ou não. A conexão estrela aterrada é raramente usada.

O tipo mais comum é a estrela não aterrada. Essa conexão é normalmente usada para fornecer serviços que combinam cargas monofásicas e uma fonte trifásica, como motores e indução.

Três transformadores monofásicos podem ser conectados em uma conexão padrão estrela não aterrada de 30 graus. O diagrama fasorial demonstrado na Figura 41 ilustram que as tensões de linha de sequência positiva no lado de alta tensão estão adiantadas em 30 graus em relação as tensões de linha de sequência positiva no lado de baixa tensão, o mesmo acontece para as tensões de fase. Para as tensões de sequência negativa, o fasor das tensões no lado de alta tensão estarão 30 graus atrasados em relação ao lado de baixa tensão. O diagrama fasorial para as correntes dessa conexão estão demonstrados na Figura 42 (KERSTING, 2012).

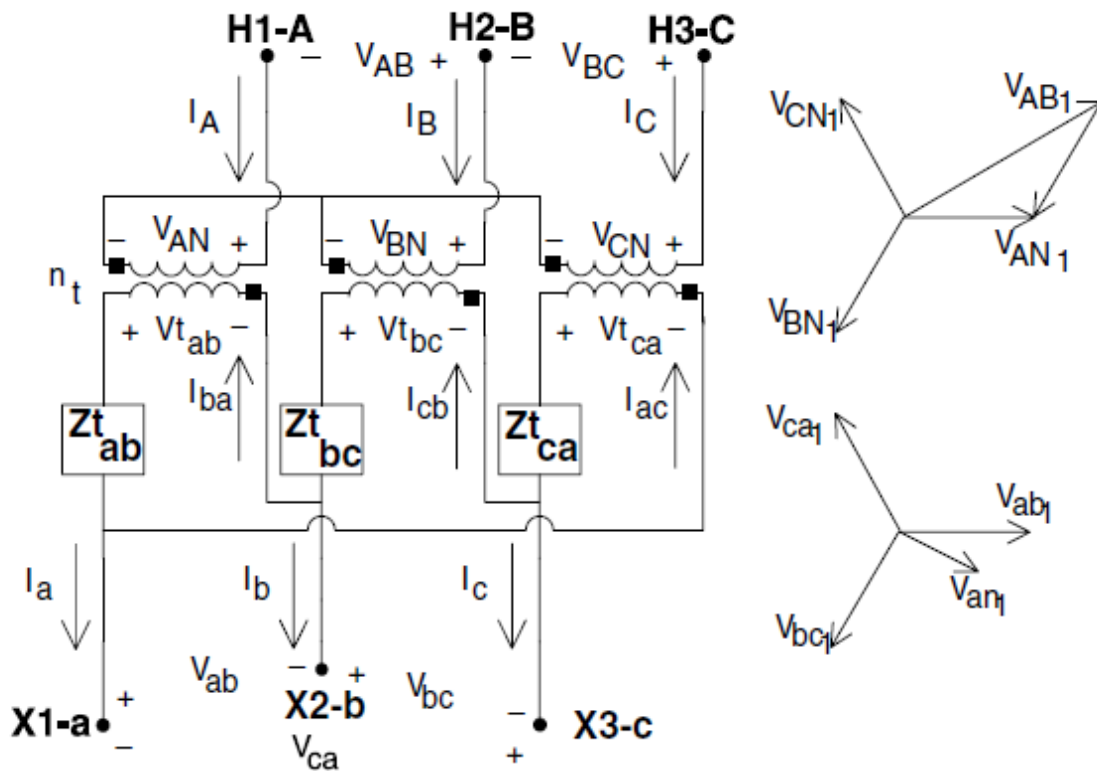


Figura 41: Conexão estrela não aterrada-delta

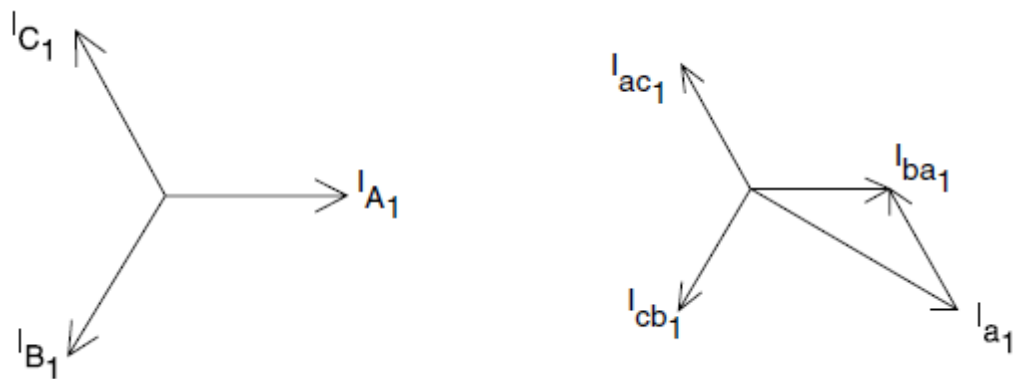


Figura 42: Diagrama fasorial de correntes de sequência positiva

Através das demonstrações já apresentadas anteriormente e dos diagramas apresentados, pode-se calcular o método para obtenção das tensões de linha no nó, que segue:

$$[VLL_{abc}] = [AV]^{-1}[VLN_{ABC}] - [Znt_{abc}][I_{ABC}] \quad (94)$$

Onde:

$$[ZNt_{abc}] = \begin{bmatrix} n_t Zt_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & n_t Zt_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & n_t Zt_{ca} \end{bmatrix} \quad (95)$$

Para obter as correntes de linha no primário como função das correntes de linha no secundário:

$$[I_{ABC}] = [d_t][I_{abc}] \quad (96)$$

Onde:

$$[d_t] = \frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (97)$$

Para o cálculo das tensões de fase é o usado o seguinte método:

$$[VLN_{abc}] = [A_t][VLN_{ABC}] - [B_t][I_{abc}] \quad (98)$$

Onde:

$$[A_t] = \frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (99)$$

$$[B_t] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 2Zt_{ab} + Zt_{bc} & 2Zt_{bc} - 2Zt_{ab} & 0 \\ 2Zt_{bc} - 2Zt_{ca} & 4Zt_{bc} - Zt_{ca} & 0 \\ Zt_{ab} - 4Zt_{ca} & -Zt_{ab} - 2Zt_{ca} & 0 \end{bmatrix} \quad (100)$$

As matrizes generalizadas para o transformador de conexão estrela não aterrado-delta foram mostradas.

2.2.3. Conexão estrela aterrado-estrela aterrado

Esse tipo de conexão é normalmente usada para alimentar cargas trifásicas e monofásicas em sistemas multiaterrado à 4 fios. A conexão estrela aterrado-estrela aterrado está demonstrada na Figura 43 (KERSTING, 2012).

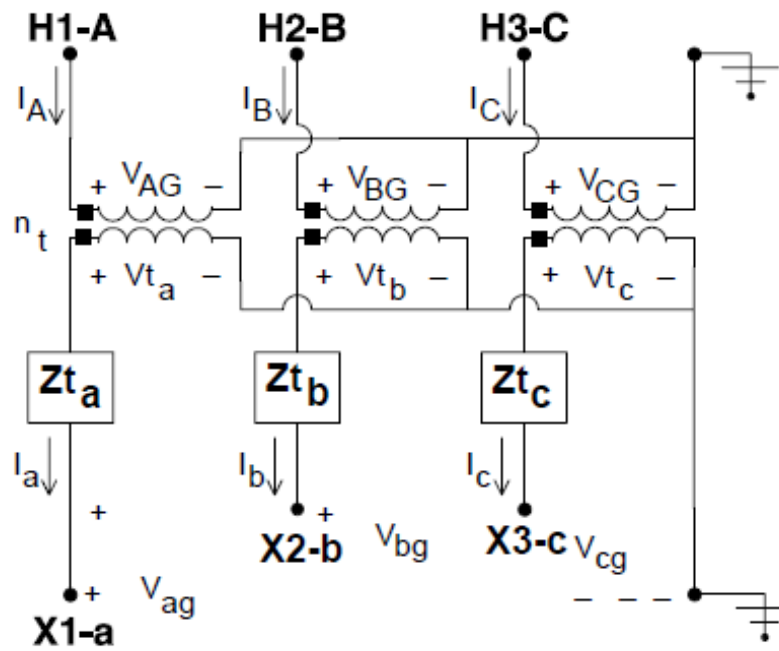


Figura 43: Conexão estrela aterrado-estrela aterrado

O método para obter as tensões linha-terra no primário está demonstrado a seguir:

$$[VLG_{ABC}] = [AV][VLG_{abc}] + [Zt_{abc}][I_{abc}] \quad (101)$$

Onde:

$$[a_t] = [AV] = \begin{bmatrix} n_t & 0 & 0 \\ 0 & n_t & 0 \\ 0 & 0 & n_t \end{bmatrix} \quad (102)$$

Para obter as correntes de linha no primário como função das correntes de linha no secundário:

$$[I_{ABC}] = [d_t][I_{abc}] \quad (103)$$

Onde:

$$[d_t] = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_t} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_t} \end{bmatrix} \quad (104)$$

Já, para obter as tensões linha-terra no secundário faz-se uso do seguinte método:

$$[VLG_{abc}] = [AV]^{-1}[VLG_{ABC}] - [Zt_{abc}][I_{abc}] \quad (105)$$

$$[AV]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_t} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_t} \end{bmatrix} \quad (106)$$

2.2.4. Conexão Delta-Delta

Segundo KERSTING (2012), a conexão delta-delta é usada comumente em sistemas à 3 fios em delta para alimentar uma carga trifásica ou uma combinação de cargas trifásicas e monofásicas. Três transformadores monofásicos conectados em delta-delta são apresentados na Figura 44. As equações de corrente e tensão são basicamente funções da relação de transformação entre as espiras. Logo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} VLL_{AB} \\ VLL_{BC} \\ VLL_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_t & 0 & 0 \\ 0 & n_t & 0 \\ 0 & 0 & n_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vt_{ab} \\ Vt_{bc} \\ Vt_{ca} \end{bmatrix} \quad (107)$$

$$\begin{bmatrix} I_{ba} \\ I_{cb} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_t & 0 & 0 \\ 0 & n_t & 0 \\ 0 & 0 & n_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (108)$$

Onde:

$$n_t = \frac{VLLr_{hs}}{VLLr_{ls}} \quad (109)$$

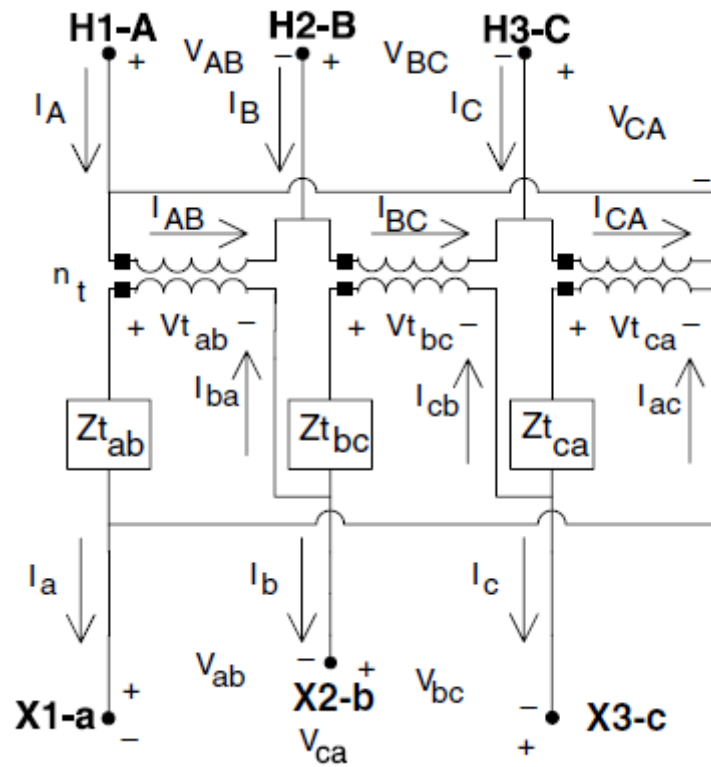


Figura 44: Conexão do tipo Delta-Delta

2.2.5. Estrela em aberto – delta em aberto

A Figura 45 mostra a configuração estrela em aberto-delta em aberto e a sequência fasorial para o primário e secundário.

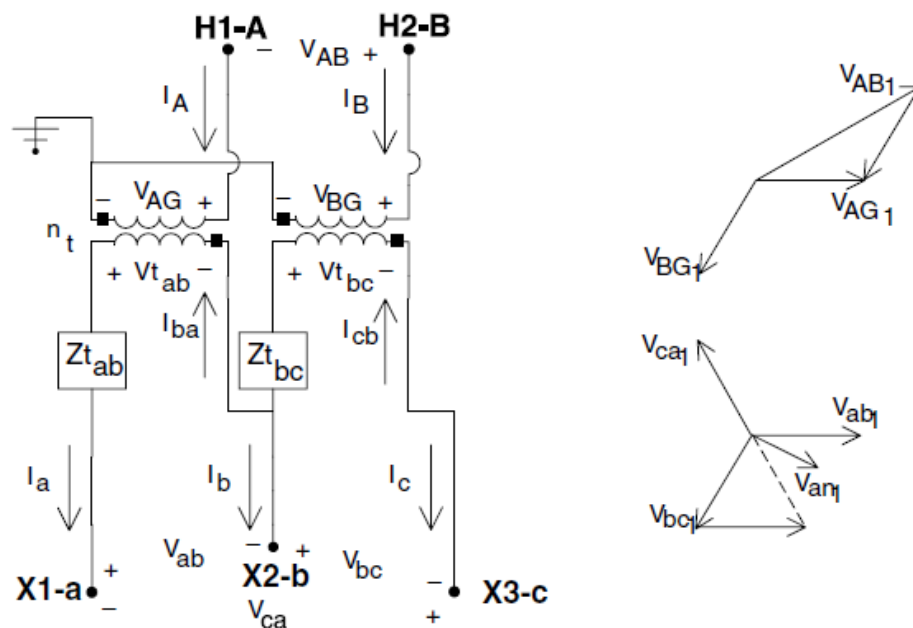


Figura 45: Configuração estrela em aberto-delta em aberto

A tensão de fase no secundário pode ser obtido através de:

$$[VLN_{abc}] = [A_t][VLG_{ABC}] - [B_t][I_{abc}] \quad (110)$$

Onde:

$$[A_t] = \frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & -2 & 0 \end{bmatrix} \quad (111)$$

$$[B_t] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2Zt_{ab} & 0 & -Zt_{bc} \\ -Zt_{ab} & 0 & -Zt_{bc} \\ -Zt_{ab} & 0 & 2Zt_{bc} \end{bmatrix} \quad (112)$$

A ligação estrela aberto-delta aberto apresentada utiliza as fases A e B no primário. Esta é apenas um das 3 tipos possíveis de conexões. As outras duas conexões possíveis usam as fases B e C e as fases C e A.

2.3. MODELOS DE CARGA

As cargas em um sistema de distribuição são normalmente especificadas pela potência consumida. A tensões das cargas serão sempre iguais a tensão no terminal lado de baixa da subestação (KERSTING, 2012).

As cargas em um sistema de distribuição podem ser divididas nos seguintes modelos:

- Potência ativa e reativa constante (Modelo PQ);
- Corrente constante;
- Impedância constante;
- Qualquer combinação acima.

A definição dos parâmetros das cargas são de primordial importância na análise do fluxo de potência. Já que uma das intenções do estudo de fluxo de potência é justamente comparar o nível de tensão real com o esperado.

2.3.1. Carga conectada em estrela

Segundo KERSTING (2012), a Figura 46 demonstra o esquema de ligação de uma carga conectada em estrela. As notações para potência complexa e tensão são as seguintes:

$$\begin{aligned} |S_a| \angle \theta_a &= P_a + jQ_a \text{ e } |V_{an}| \angle \delta_a \\ |S_b| \angle \theta_b &= P_b + jQ_b \text{ e } |V_{bn}| \angle \delta_b \\ |S_c| \angle \theta_c &= P_c + jQ_c \text{ e } |V_{cn}| \angle \delta_c \end{aligned} \quad (114)$$

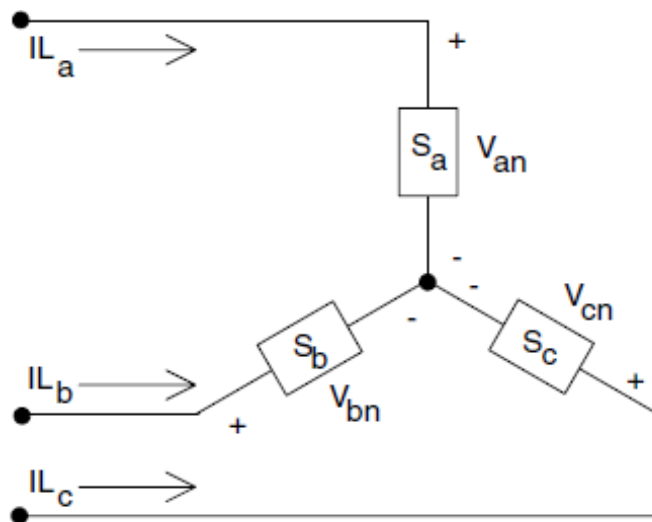


Figura 46: Carga conectada em estrela

2.3.1.1. Cargas com potência ativa e reativa constantes

As correntes de linha para cargas com potência ativa e reativa constantes (Modelo PQ) são dadas por:

$$\begin{aligned} IL_a &= \left(\frac{S_a}{V_{an}} \right)^* = \frac{|S_a|}{|V_{an}|} \angle (\delta_a - \theta_a) = |IL_a| \angle \alpha_a \\ IL_b &= \left(\frac{S_b}{V_{bn}} \right)^* = \frac{|S_b|}{|V_{bn}|} \angle (\delta_b - \theta_b) = |IL_b| \angle \alpha_b \\ IL_c &= \left(\frac{S_c}{V_{cn}} \right)^* = \frac{|S_c|}{|V_{cn}|} \angle (\delta_c - \theta_c) = |IL_c| \angle \alpha_c \end{aligned} \quad (115)$$

Neste modelo, as tensões de fase irão mudar durante cada iteração até a convergência ser alcançada.

2.3.1.2. Cargas com impedância constante

A impedância constante da carga é primeiramente determinada para uma potência complexa especificada e considerando as tensões de fase:

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{|V_{an}|^2}{S_a^*} = \frac{|V_{an}|^2}{|S_a|} \angle \theta_a = |Z_a| \angle \theta_a \\ Z_b &= \frac{|V_{bn}|^2}{S_b^*} = \frac{|V_{bn}|^2}{|S_b|} \angle \theta_b = |Z_b| \angle \theta_b \\ Z_c &= \frac{|V_{cn}|^2}{S_c^*} = \frac{|V_{cn}|^2}{|S_c|} \angle \theta_c = |Z_c| \angle \theta_c \end{aligned} \quad (116)$$

As correntes da carga como funções das impedâncias constantes da carga são dadas por:

$$\begin{aligned} IL_a &= \frac{V_{an}}{Z_a} = \frac{|V_{an}|}{|Z_a|} \angle (\delta_a - \theta_a) = |IL_a| \angle \alpha_a \\ IL_b &= \frac{V_{bn}}{Z_b} = \frac{|V_{bn}|}{|Z_b|} \angle (\delta_b - \theta_b) = |IL_b| \angle \alpha_b \\ IL_c &= \frac{V_{cn}}{Z_c} = \frac{|V_{cn}|}{|Z_c|} \angle (\delta_c - \theta_c) = |IL_c| \angle \alpha_c \end{aligned} \quad (117)$$

Neste modelo, as tensões de fase irão se alterar durante cada iteração, mas as impedâncias calculadas não se alteram.

2.3.1.3. Carga com corrente constante

Neste modelo os valores das correntes são calculados de acordo com as equações (118) e então são mantidas constantes com o ângulo da tensão (δ) variando, resultando em uma mudança no ângulo da corrente e então o fator de potência na carga permanece constante:

$$\begin{aligned} IL_a &= |IL_a| \angle (\delta_a - \theta_a) \\ IL_b &= |IL_b| \angle (\delta_b - \theta_b) \\ IL_c &= |IL_c| \angle (\delta_c - \theta_c) \end{aligned} \quad (118)$$

Onde:

δ_{abc} = ângulo das tensões de fase

θ_{abc} = ângulo do fator de potência

2.3.1.4. Cargas combinadas

Cargas combinadas podem ser modeladas escolhendo uma porcentagem do total de carga de cada um dos três modelos acima. A corrente de linha total entrando na carga será a soma das três componentes.

2.3.2. Carga conectada em delta

Segundo KERSTING (2012), o modelo para carga conectada em delta está demonstrado na Figura 47. A notação para potência complexa e tensões a seguir:

$$\begin{aligned} |S_{ab}| \angle \theta_{ab} &= P_{ab} + jQ_{ab} \text{ e } |V_{ab}| \angle \delta_{ab} \\ |S_{bc}| \angle \theta_{bc} &= P_{bc} + jQ_{bc} \text{ e } |V_{bc}| \angle \delta_{bc} \\ |S_{ca}| \angle \theta_{ca} &= P_{ca} + jQ_{ca} \text{ e } |V_{ca}| \angle \delta_{ca} \end{aligned} \quad (119)$$

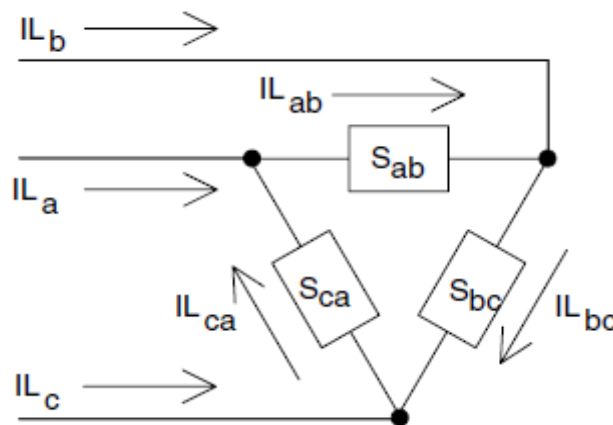


Figura 47: Carga conectada em delta

2.3.2.1. Carga com potência ativa e reativa constante

As correntes da carga conectada em delta são:

$$\begin{aligned} IL_{ab} &= \left(\frac{S_{ab}}{V_{ab}} \right)^* = \frac{|S_{ab}|}{|V_{ab}|} \angle (\delta_{ab} - \theta_{ab}) = |IL_{ab}| \angle \alpha_{ab} \\ IL_{bc} &= \left(\frac{S_{bc}}{V_{bc}} \right)^* = \frac{|S_{bc}|}{|V_{bc}|} \angle (\delta_{bc} - \theta_{bc}) = |IL_{bc}| \angle \alpha_{bc} \\ IL_{ca} &= \left(\frac{S_{ca}}{V_{ca}} \right)^* = \frac{|S_{ca}|}{|V_{ca}|} \angle (\delta_{ca} - \theta_{ca}) = |IL_{ca}| \angle \alpha_{ca} \end{aligned} \quad (120)$$

Neste modelo, as tensões de linha vão mudar durante cada iteração resultando em novos valores de corrente e ângulos no início da iteração.

2.3.2.2. Carga com impedância constante

A impedância constante da carga é primeiramente determinada para uma potência complexa especificada e tensões de linha:

$$\begin{aligned}
 Z_{ab} &= \frac{|V_{ab}|^2}{S_{ab}^*} = \frac{|V_{ab}|^2}{|S_{ab}|} \angle \theta_{ab} = |Z_{ab}| \angle \theta_{ab} \\
 Z_{bc} &= \frac{|V_{bc}|^2}{S_{bc}^*} = \frac{|V_{bc}|^2}{|S_{bc}|} \angle \theta_{bc} = |Z_{bc}| \angle \theta_{bc} \\
 Z_{ca} &= \frac{|V_{ca}|^2}{S_{ca}^*} = \frac{|V_{ca}|^2}{|S_{ca}|} \angle \theta_{ca} = |Z_{ca}| \angle \theta_{ca}
 \end{aligned} \tag{121}$$

As correntes das cargas em delta em função das impedâncias constantes da carga são:

$$\begin{aligned}
 IL_{ab} &= \frac{V_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{|V_{ab}|}{|Z_{ab}|} \angle (\delta_{ab} - \theta_{ab}) = |IL_{ab}| \angle \alpha_{ab} \\
 IL_{bc} &= \frac{V_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{|V_{bc}|}{|Z_{bc}|} \angle (\delta_{bc} - \theta_{bc}) = |IL_{bc}| \angle \alpha_{bc} \\
 IL_{ca} &= \frac{V_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{|V_{ca}|}{|Z_{ca}|} \angle (\delta_{ca} - \theta_{ca}) = |IL_{ca}| \angle \alpha_{ca}
 \end{aligned} \tag{122}$$

2.3.2.3. Cargas com corrente constante

Neste modelo os valores das correntes são calculados de acordo com as equações abaixo e então mantidos constantes enquanto o ângulo da tensão (δ) muda durante cada iteração. Isso mantém o valor do fator de potência da carga constante:

$$\begin{aligned}
 IL_{ab} &= |IL_{ab}| \angle (\delta_{ab} - \theta_{ab}) \\
 IL_{bc} &= |IL_{bc}| \angle (\delta_{bc} - \theta_{bc}) \\
 IL_{ca} &= |IL_{ca}| \angle (\delta_{ca} - \theta_{ca})
 \end{aligned} \tag{123}$$

2.3.2.4. Combinação de cargas

Cargas combinadas podem ser modeladas escolhendo uma porcentagem do total de carga de cada um dos três modelos acima. A corrente de linha total entrando na carga será a soma das três componentes.

2.3.2.5. Correntes de linha alimentando uma carga conectada em delta

As correntes de linha entrando em uma carga conectada em delta são determinadas através da aplicação da lei das correntes de *Kirchhoff* em cada nó do delta. Na forma matricial as equações são:

$$\begin{bmatrix} IL_a \\ IL_b \\ IL_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} IL_{ab} \\ IL_{bc} \\ IL_{ca} \end{bmatrix} \quad (124)$$

2.3.3. Cargas bifásicas e monofásicas

Tanto as cargas conectadas em estrela quantas as conectadas em delta são modeladas colocando o valor zero para as fases em falta. Na fases existentes o cálculo da corrente é realizada usando as equações apresentadas para potência constante, impedância constante e corrente constante (KERSTING, 2012).

2.3.4. Capacitores *Shunt*

Em sistemas de distribuição é comum encontrar o uso de banco de capacitores shunt com o intuito de manter os níveis de tensão em valores adequados para que o consumidor consuma uma energia de qualidade. Os bancos capacitores são projetados com susceptâncias conectadas tanto em estrela quando em delta.

Assim como nos modelos de carga todos os bancos capacitores são projetados como trifásicos e no caso de haver fase faltante, a corrente na mesma será igual a zero (KERSTING, 2012).

2.3.4.1. Banco de capacitores trifásico conectado em estrela

O modelo de um banco capacitor trifásico conectado em estrela está demonstrado na Figura 48. Cada capacitor do banco está especificado de acordo com os seus valores de potência reativa e tensão de fase. A susceptância para cada unidade é calculada em Siemens. Sendo calculada da seguinte forma:

$$B_c = \frac{kvar}{kV_{LN}^2 \cdot 1000} S \quad (125)$$

Depois de calculada a susceptância, o cálculo das correntes que alimentam o banco acontece da seguinte forma:

$$\begin{aligned} IC_a &= jB_a \cdot V_{an} \\ IC_b &= jB_b \cdot V_{bn} \\ IC_c &= jB_c \cdot V_{cn} \end{aligned} \quad (126)$$

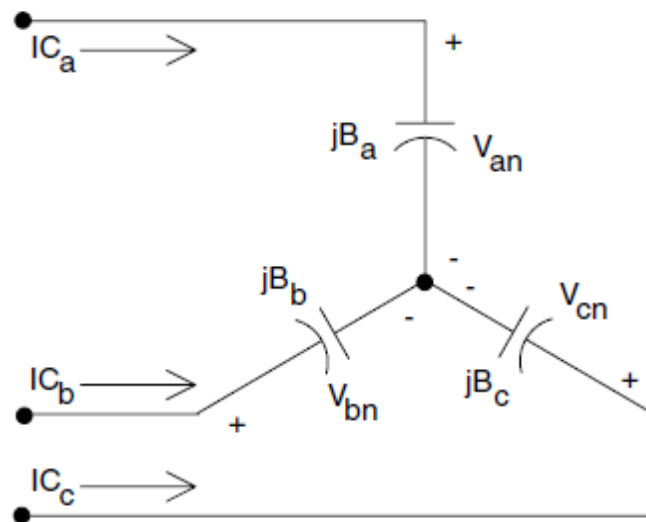


Figura 48: Banco de capacitores trifásicos conectados em estrela

2.3.4.2. Banco de capacitores trifásico conectado em delta

O modelo de um banco capacitor trifásico conectado em delta está demonstrado na Figura 49. Cada capacitor do banco está especificado de acordo com os seus valores de potência reativa e tensão de de linha. A susceptância para cada unidade é calculada em Siemens. Sendo calculada da seguinte forma:

$$B_c = \frac{kvar}{kV_{LL}^2 \cdot 1000} S \quad (127)$$

Depois de calculada a susceptância, o cálculo das correntes alimentam o banco acontece da seguinte forma:

$$\begin{aligned} IC_{ab} &= jB_{ab} \cdot V_{ab} \\ IC_{bc} &= jB_{bc} \cdot V_{bc} \\ IC_{ca} &= jB_{ca} \cdot V_{ca} \end{aligned} \quad (128)$$

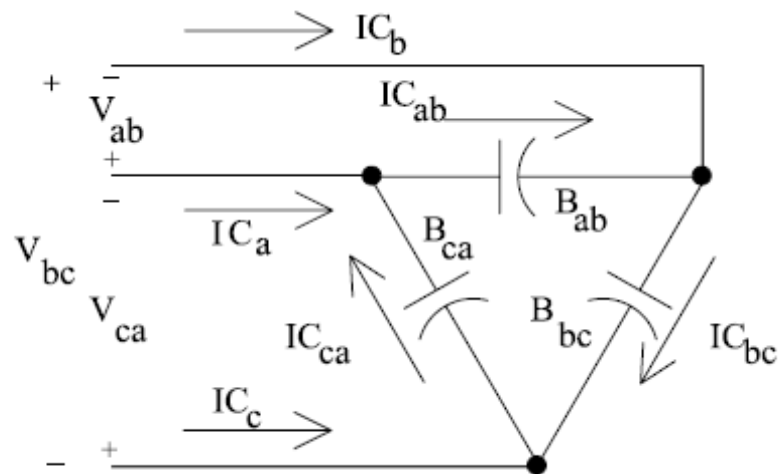


Figura 49: Banco de capacitores trifásicos conectados em delta

As correntes da conexão em delta do banco capacitor, podem ser calculadas aplicando a lei das correntes de *Kirchhoff*, tendo como resultado:

$$\begin{bmatrix} I_{C_a} \\ I_{C_b} \\ I_{C_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{C_{ab}} \\ I_{C_{bc}} \\ I_{C_{ca}} \end{bmatrix} \quad (129)$$

3. REALIZAÇÃO DE ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA E CURTO-CIRCUITO NO *OPENDSS*

3.1. ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA NO *OPENDSS*

A resolução do problema de fluxo de potência é provavelmente a aplicação mais comum para o *OpenDSS*. O software tem características diferentes da maioria das ferramentas usadas para resolução de fluxo de potência.

O *OpenDSS* foi projetado para realizar estudos de fluxo de potência para sistemas de distribuição, onde um sistema de potência é a principal fonte de energia. Enquanto a maioria dos solucionadores do problema de fluxo de potência trabalham somente com circuitos radiais, o *OpenDSS* resolve circuitos em malha tão bem quanto resolve os radiais. Este software pode ser uma ferramenta poderosíssima se aplicado por concessionárias de distribuição de energia elétrica (DUGAN, 2013).

O fluxo de potência pode ser executado de diversas maneiras, desde a padrão chamada de *SnapShot mode*, *Daily mode*, *Dutycycle mode*, *Monte Carlo mode*, entre outras onde a carga varia com o tempo.

Quando o problema de fluxo de potência é solucionado o software *OpenDSS* disponibilizará para o usuário as informações de perdas, tensões, correntes, entre outras informações que podem ser especificadas para o sistema todo, para um componente individual ou certas áreas do alimentador.

No *OpenDSS* há basicamente dois tipos de solução que são:

- a) Fluxo de potência iterativo
- b) Solução direta

Para o caso a), as cargas e geradores são fontes de injeção. No caso b), elas são incluídas como admitâncias na matriz de admitâncias do sistema, que é resolvida direta sem iteração.

Há dois tipos de algoritmos empregados no modo iterativo de solução:

- a) Modo "*Normal*" de injeção de corrente
- b) Modo "*Newton*"

O modo "*Normal*" é mais rápido, porém o modo "*Newton*" se apresenta mais robusto em casos onde o circuito estudado é de difícil solução. O modo "*Normal*" é um

método iterativo de ponto-fixa e trabalha bem em quase todos os sistemas de distribuição de energia elétrica (DUGAN; MCDERMOTT, 2011).

A seguir uma descrição mais detalhada sobre como o *OpenDSS* realiza a sua solução para o fluxo de potência.

3.1.1. Método da Admitância Primitiva

Segundo DUGAN; MCDERMOTT, (2011), para o uso do método da admitância primitiva cada elemento do circuito é representado por sua matriz de admitâncias primitiva ou uma parte – geralmente a parte linear – do circuito é representada por uma matriz de admitâncias primitivas.

Para representar o método temos o esquema da Figura 50 abaixo que apresenta o desenvolvimento da matriz Y para a impedância mútua entre duas fases:

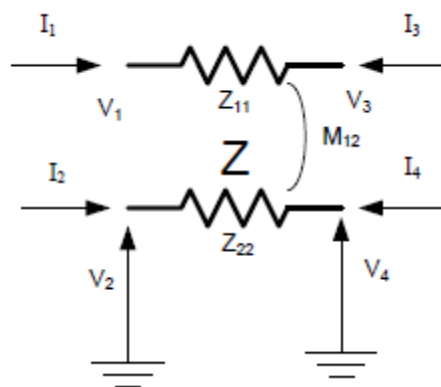


Figura 50: Impedância mútua entre duas fases

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & M_{12} \\ M_{12} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (130)$$

Z é a matriz 2×2 que descreve as características de impedância para as impedâncias acopladas. O elemento tem 4 terminais como mostrado na Figura 49 e um sistema de equações é escrito na forma de admitâncias nodais em relação as correntes entrando em cada terminal e a tensão de cada terminal em relação ao terra.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{-1} & -Z^{-1} \\ -Z^{-1} & Z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (131)$$

Linhas, banco de capacitores e transformadores podem ser modelados da maneira que foi apresentado o método, apenas alterando o número de fases e espiras.

O algoritmo para a solução padrão do *OpenDSS* está demonstrado na Figura 51. Cada elemento de matriz Y primitiva é somado dentro da matriz Y de todo sistema. Uma equação então é montada juntando os vetores de corrente com as correntes de compensação das cargas, geradores, etc. A corrente de compensação é a diferença entre a corrente usada pela parte não-linear e a linear dos elementos.

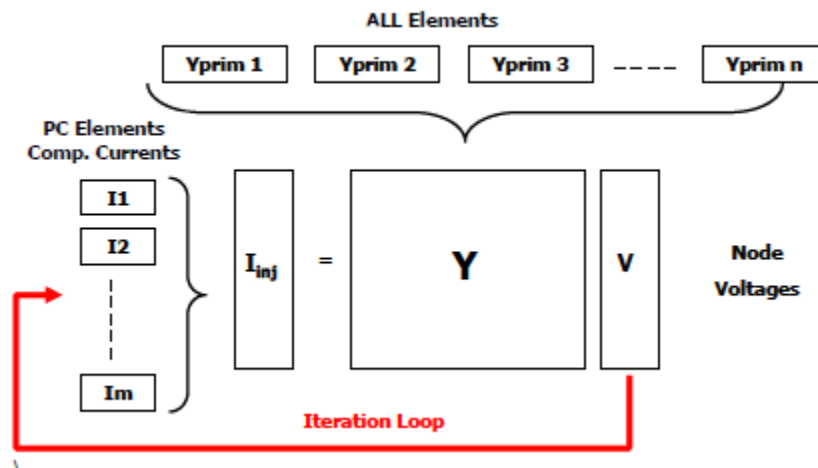


Figura 51: Solução padrão de fluxo de potência

O método da Figura 51 é rápido e útil para soluções sequenciais no tempo devido a sua velocidade. No entanto, pode ser um pouco sensível para alguns modelos de circuitos. Para alcançar boas características de convergência para sistemas de distribuição:

- O primeira suposição deve ser próxima da solução final;
- As impedâncias série dos elementos entregadores de potência devem ser menores que as impedâncias shunt das cargas.

3.1.2. MÉTODO Z_{bus}

Segundo CHEN *et al.* (1991), o método Z_{bus} usa uma matriz de impedância esparsa bifatorada e injeções de corrente para resolver as equações da rede. O comportamento de convergência da Z_{bus} é muito dependente do número de tensões especificadas para as barras do sistema. Por exemplo, se há uma única barra do sistema com tensões especificadas, a barra de balanço, a taxa de convergência é algo próximo do método de Newton-Raphson. O método Z_{bus} é primordial quando se busca uma rápida convergência. Para sistemas de distribuição o método é bem eficaz quando a única barra do sistema com tensão especificada é a barra da subestação e cada barra de geração for considerada como uma barra PQ. Esta última consideração é

válida em redes de distribuição ativas nas quais os geradores não participam do controle coordenado de tensão em conjunto com equipamentos da concessionária, tais como: bancos de capacitores chaveados, reguladores de tensão e transformadores de força subestações de distribuição com mecanismo de comutação de tap sob carga.

O método Z_{bus} é baseado no princípio de superposição aplicado ao cálculo das tensões das barras. Ou seja, a tensão de cada barra é resultante de duas contribuições diferentes, a tensão específica da fonte e as injeções de corrente equivalentes. As cargas, geradores, capacitores e reatores são modelados como fontes de injeção de corrente nas barras respectivas.

O princípio da superposição dita que apenas um tipo de fonte será considerado por vez no momento do cálculo das tensões na barra. Por outro lado, quando a fonte de tensão da barra é ativada, todas as fontes de injeção de corrente são desconectadas do sistema. Quando todas as fontes de injeção de corrente são conectadas ao sistema, a barra de balanço é curto-circuitada ao terra.

A componente de cada tensão obtida ativando apenas a fonte de tensão da barra balanço representa a tensão do sistema operando a vazio. Essa componente pode ser determinada diretamente como igual a tensão da barra balanço para cada barra no sistema. Entretanto, a outra componente, afetada pelas correntes da carga e as correntes dos geradores, não pode ser determinada diretamente. Considerando que as correntes da carga e dos geradores são afetadas pelas tensões nas barras e vice-versa, essas grandezas devem ser determinadas de maneira iterativa. O algoritmo está demonstrado no Fluxograma 1.

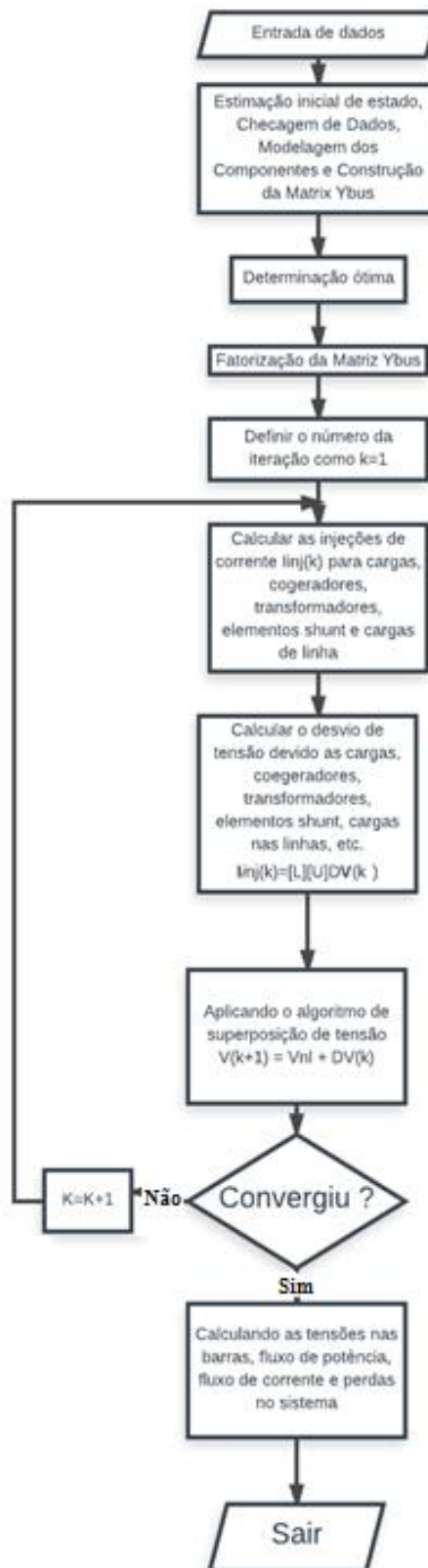


Figura 52: Fluxograma do Método método Zbus

3.2. ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO NO OPENDSS

3.2.1. Análise de Faltas em coordenadas de fase usando matriz Z_{bus} .

O OpenDSS usa o método Z_{bus} para sua análise de curto-circuito em um sistema de distribuição de energia elétrica. De acordo com STAGG e ABIAD (1968), a matriz das impedâncias das barras fornece meios para os cálculos de corrente e tensão de curto-circuito quando o terra é usada como referência. Com a matriz de impedâncias das barras montada é possível usar os seus valores diretamente para o cálculo de diversos tipos de estudos de falta.

A impedância do sistema pode ser obtida através do Teorema de Thevenin e a tensão de circuito aberto é representada pela tensão na barra antes da falta. A equação de desempenho do sistema durante a falta é a seguinte:

$$E_{BUS(F)}^{a,b,c} = E_{BUS(0)}^{a,b,c} - Z_{BUS}^{a,b,c} I_{BUS(F)}^{a,b,c} \quad (132)$$

Onde os elementos de $E_{BUS}^{a,b,c}{}_{(F)}$ são as tensões trifásicas nas barras.

As tensões antes da falta, $E_{BUS}^{a,b,c}{}_{(0)}$, são representados pela equação (133):

$$\begin{bmatrix} E_{1(0)}^{a,b,c} \\ \dots \\ E_{p(0)}^{a,b,c} \\ \dots \\ E_{n(0)}^{a,b,c} \end{bmatrix} \quad (133)$$

As correntes durante a falta na barra p , $I_{BUS}^{a,b,c}{}_{(F)}$, estão apresentadas na equação:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ I_{p(F)}^{a,b,c} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (134)$$

A matriz de impedâncias das barras trifásicas é representada pela equação (135).

$$\begin{bmatrix} Z_{11}^{a,b,c} & \dots & Z_{1p}^{a,b,c} & \dots & Z_{1n}^{a,b,c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{p1}^{a,b,c} & \dots & Z_{pp}^{a,b,c} & \dots & Z_{pn}^{a,b,c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1}^{a,b,c} & \dots & Z_{np}^{a,b,c} & \dots & Z_{nn}^{a,b,c} \end{bmatrix} \quad (135)$$

Onde elementos de $Z_{BUS}^{a,b,c}$ são matrizes 3x3. A equação (135) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} E_{1(F)}^{a,b,c} &= E_{1(0)}^{a,b,c} - Z_{1p}^{a,b,c} I_p^{a,b,c} \\ E_{2(F)}^{a,b,c} &= E_{2(0)}^{a,b,c} - Z_{2p}^{a,b,c} I_p^{a,b,c} \\ \dots \dots \dots \\ E_p^{a,b,c} &= E_p^{a,b,c} - Z_{pp}^{a,b,c} I_p^{a,b,c} \\ \dots \dots \dots \\ E_n^{a,b,c} &= E_n^{a,b,c} - Z_{np}^{a,b,c} I_p^{a,b,c} \end{aligned} \quad (136)$$

O vetor de tensões trifásicas na falta da barra p é representado pela equação:

$$E_{p(F)}^{a,b,c} = Z_F^{a,b,c} I_{p(F)}^{a,b,c} \quad (137)$$

Onde $Z_F^{a,b,c}$ é matriz de impedâncias trifásicas para a falta. Os elementos da matriz 3x3 dependem do tipo de falta e da impedância da falta. Substituindo a equação (137) na equivalente em p da equação (136), obtém-se:

$$Z_F^{a,b,c} I_{p(F)}^{a,b,c} = E_{p(0)}^{a,b,c} - Z_{pp}^{a,b,c} I_{p(F)}^{a,b,c} \quad (138)$$

Resolvendo a equação (138) em função de $I_p^{a,b,c}_{(F)}$:

$$I_{p(F)}^{a,b,c} = (Z_F^{a,b,c} + Z_{pp}^{a,b,c})^{-1} E_{p(0)}^{a,b,c} \quad (139)$$

Substituindo a equação (139) na equação (137), a tensão de falta trifásica na barra p é igual a:

$$E_{p(F)}^{a,b,c} = Z_F^{a,b,c} (Z_F^{a,b,c} + Z_{pp}^{a,b,c})^{-1} E_{p(0)}^{a,b,c} \quad (140)$$

Da mesma forma, as tensões trifásicas nas outras barras podem ser obtidas substituindo $I_p^{a,b,c}_{(F)}$ da equação (139). Assim:

$$E_{i(F)}^{a,b,c} = E_{i(0)}^{a,b,c} - Z_{ip}^{a,b,c} (Z_F^{a,b,c} + Z_{pp}^{a,b,c})^{-1} E_{p(0)}^{a,b,c}, \quad i \neq p \quad (141)$$

Quando se deseja expressar os parâmetros de falta no circuito em forma de admitâncias, as faltas trifásicas na barra p são:

$$I_{p(F)}^{a,b,c} = Y_F^{a,b,c} E_{p(F)}^{a,b,c} \quad (142)$$

Onde $Y_F^{a,b,c}$ é matriz de admitância trifásica para a falta. Substituindo $I_{p(F)}^{a,b,c}$ na equação correspondente para p na equação (136), tem-se:

$$E_{p(F)}^{a,b,c} = E_{p(0)}^{a,b,c} - Z_{p,p}^{a,b,c} Y_F^{a,b,c} E_{p(F)}^{a,b,c} \quad (143)$$

Resolvendo a equação (142) para $E_{p(F)}^{a,b,c}$:

$$E_{p(F)}^{a,b,c} = (U + Z_{p,p}^{a,b,c} Y_F^{a,b,c})^{-1} E_{p(0)}^{a,b,c} \quad (144)$$

Substituindo para $E_{p(F)}^{a,b,c}$ na equação (141), a corrente de falta trifásica para a barra p é igual a:

$$I_{p(F)}^{a,b,c} = Y_F^{a,b,c} (U + Z_{p,p}^{a,b,c} Y_F^{a,b,c})^{-1} E_{p(0)}^{a,b,c} \quad (145)$$

Similarmente, as tensões nas barras diferentes de p podem ser obtidas substituindo para $I_{p(F)}^{a,b,c}$ da equação (144). Dessa forma,

$$E_{i(F)}^{a,b,c} = E_{i(0)}^{a,b,c} - Z_{p,p}^{a,b,c} Y_F^{a,b,c} (U + Z_{p,p}^{a,b,c} Y_F^{a,b,c})^{-1} E_{p(0)}^{a,b,c}, \quad i \neq p \quad (146)$$

As corrente de falta que fluem pelos elementos da rede podem ser calculadas através das tensões obtidas na equação (140) e (141) ou através das equações (144) e (146). Essas correntes em termos das tensões dos elementos da rede são iguais a:

$$\bar{i}_{(F)}^{a,b,c} = [y^{a,b,c}] \bar{v}_{(F)}^{a,b,c} \quad (147)$$

Onde os elementos do vetor das tensões são iguais a:

$$\bar{i}_{ij(F)}^{a,b,c} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{ij(F)}^a \\ \bar{i}_{ij(F)}^b \\ \bar{i}_{ij(F)}^c \end{bmatrix} \quad (148)$$

Os elementos do vetor das tensões são iguais a:

$$\bar{v}_{ij(F)}^{a,b,c} = \begin{bmatrix} \bar{v}_{ij(F)}^a \\ \bar{v}_{ij(F)}^b \\ \bar{v}_{ij(F)}^c \end{bmatrix} \quad (149)$$

E os elementos da matriz admitância são iguais a:

$$y_{ij,kl}^{a,b,c} = \begin{bmatrix} y_{ij,kl}^{aa} & y_{ij,kl}^{ab} & y_{ij,kl}^{ac} \\ y_{ij,kl}^{ba} & y_{ij,kl}^{bb} & y_{ij,kl}^{bc} \\ y_{ij,kl}^{ca} & y_{ij,kl}^{cb} & y_{ij,kl}^{cc} \end{bmatrix} \quad (150)$$

Onde $y_{ij,kl}^{b,c}$ é a admitância mútua entre as fases b dos elementos da rede $i-j$ e fase c dos elementos da rede $k-l$. As correntes trifásicas dos elementos da rede $i-j$ podem ser calculados como segue:

$$i_{ij(F)}^{a,b,c} = \bar{y}_{ij,\rho\sigma}^{a,b,c} \bar{v}_{\rho\sigma(F)}^{a,b,c} \quad (151)$$

Onde $\rho\sigma$ se refere tanto ao elemento $i-j$ como também aos elementos mutualmente acoplados em $i-j$. Sendo,

$$\bar{v}_{\rho\sigma(F)}^{a,b,c} = \bar{E}_{\rho(F)}^{a,b,c} - \bar{E}_{\sigma(F)}^{a,b,c} \quad (152)$$

A equação (151) torna-se igual a:

$$i_{ij(F)}^{a,b,c} = \bar{y}_{ij,\rho\sigma}^{a,b,c} \left(\bar{E}_{\rho(F)}^{a,b,c} - \bar{E}_{\sigma(F)}^{a,b,c} \right) \quad (153)$$

As equações desenvolvidas nesta seção podem ser usadas tanto para estudos de curto-circuito balanceados ou desbalanceados.

3.2.2. Estudo completo de curto-circuito

É um estudo convencional onde são realizados estudos de falta em todas as barras, onde o programa calculará as tensões e correntes para todos os tipos de falta: falta em todas as fases, falta linha-terra em cada fase, falta linha-linha e falta linha-linha-terra. Este método é indicado para estudos de configuração de religadores e dimensionamento de elos fusíveis. Este método é aplicado através do comando “*Set Mode=FaultStudy*”.

3.2.3. Estudo para uma única falha

Neste modo o usuário ganha uma independência, onde ele pode escolher qual o tipo de falta ele quer simular, em qual(is) trecho(s) do alimentador ele quer realizar o estudo e qual a magnitude do curto-circuito. Neste tipo de estudo o *OpenDSS* cria um elemento, que por *default* é um resistor de resistência muito pequena, e o mesmo estará simulando o curto-circuito, podendo ser conectado entre fases, entre uma fase e uma terra, entre duas fases e o terra e também um curto-circuito trifásico. A aplicação do método na linguagem de programação do *OpenDSS* acontece da seguinte forma:

```
new fault.objetodefalta phases=3 bus1=12.1.2.3
```

Figura 53: Cadastro de uma falha trifásica

Onde no caso apresentado é criado um objeto de falta (new fault.objetodefalta), com três fases, aplicados na barra 12 (bus1) nos terminais 1,2 e 3 da mesma (.1.2.3). Logo, trata-se de um curto-circuito trifásico.

3.2.4. Estudo de falta Monte Carlo

Neste tipo de modo o usuário escolhe onde estão presentes os curtos-circuitos e então ao ser selecionado o modo de falta Monte Carlo, o programa irá escolher uma falta de cada vez e então resolvendo o circuito, escolhendo um valor de resistência para o objeto de falta.

Este modo é usado para calcular índices de afundamento de tensão, analisar as tensões que resultam no local de uma geração distribuída, entre outros. O estudo de Monte Carlo está presente em estudos variantes no tempo, os chamados time-series e não é usado para métodos iterativos, para a solução deste tipo de modo é usado o método direto de resolução do fluxo de potência Este método é aplicado através do comando "*Set Mode=MF*".

4. UTILIZAÇÃO DO *OPENDSS* EM AMBIENTE *MATLAB*

Para expandir a experiência com o software *OpenDSS* pode-se usar a interface COM. Esta interface permite que o usuário possa desenvolver algoritmos através de programas como VBA, Excel, *MATLAB* ou *Python*, com o objetivo de controlar o *OpenDSS* para obter informações que não poderiam ser obtidas pelo software ou que poderiam ser de difícil implementação, obter resultados e gráficos precisos, entre outras finalidades. O *OpenDSS* não possui a capacidade de realizar loops, então a implantação de loops é uma das funções mais utilizadas através da interface COM (SEXAUER, 2012).

4.1. INTERFACE COM ATRAVÉS DO *MATLAB*

De acordo com SEXAUER (2012), para o uso do *MATLAB* para controle do *OpenDSS* é primordial ter acesso a biblioteca de funções da interface COM que pode ser encontrada acessando a aba desenvolvedor do Excel e depois a ferramenta VBA onde a opção de referência *OpenDSS Engine* deve ser habilitada.

Através de um arquivo criado do formado *DSS*, chamado arquivo pai, podem ser criados as classes filhas, as principais são:

- Interface Text
- Interface Circuit
- Interface Solution

A seguir uma análise mais detalhada de cada uma das classes principais.

4.1.1. Interface Text

A interface Text é a interface mais simples e uma das mais utilizadas. Através dessa interface é permitido executar as linhas de comando do *OpenDSS*, ou seja, o que é realizado no modo Standalone do software poderá ser realizado através do *MATLAB*.

Para usar a interface é preciso definir a sua propriedade Command que correspondente na versão Standalone, como exemplo a criação de Capacitor:

```
DSSText.Command = 'New capacitor.cap1 bus1=2 phases=3 kVAr=200'; %CRIANDO
UM ELEMENTO ATRAVÉS DA INTERFACE TEXT
```

Figura 54: Exemplo de uso da interface text para criação de elemento

4.1.2. Interface Circuit

A interface Circuit tem como principal função editar elementos presentes no circuito. Os elementos do *OpenDSS*, como linhas, cargas ou capacitores, possuem uma classe filho sob a interface Circuit. Essas classes possuem funções que permitem o uso loop através de um algoritmo. Por exemplo, alterar o valor da potência nominal de um capacitor.

```
DSSCircuit.SetActiveElement ('Capacitor.Cap1') %CHAMA O ELEMENTO ATIVO
DO CIRCUITO, NO CASO, Capacitor.Cap1
```

Figura 55: Exemplo de uso da Circuit para escolher um elemento dentro do circuito

```
DSSCircuit.ActiveDSSElement.Properties('kVar').Val = 1200 %ESCOLHE A
PROPRIEDADE QUE SE DESEJA ALTERAR E PARA QUAL VALOR, NO CASO, kVar PARA
1200
```

Figura 56: Exemplo de uso da Circuit para alterar propriedades de elemento dentro do circuito

Outra função desta interface é obter por exemplo o nome das barras e tensões nos nós das barras, por exemplo:

```
VA = DSSCircuit.AllNodeVmagPUByPhase(1); % ARMAZENA TODOS OS VALORES DE
TENSÃO NA FASE A DAS BARRAS.

BusNames=DSSCircuit.AllBusNames % ARMAZENA O NOME DE TODAS AS BARRAS
```

Figura 57: Exemplos de uso da Circuit para armazenar os valores de tensão e nomes das barra

A interface Circuit ainda possui várias funções que podem ser estudadas através dos documentos fornecidos para estudo de controle via COM Interface.

4.1.3. Interface Solution

Através da interface Solution é possível controlar os modos de operação do *OpenDSS*. É através dela que o circuito será resolvido, onde poderá se verificar a convergência e qualquer outro aspecto que se relacione com a solução. A seguir um exemplo de como obter a solução via interface *COM* usando o *MATLAB*:

```
DSSSolution.Solve; % RESOLUÇÃO PADRÃO DO CIRCUITO
```

Figura 58: Exemplo de uso da Solve para realizar a solução do circuito

Sendo assim, através da interface Solution controles minuciosos podem ser realizados assim como podem ser obtidas informações cada vez mais específicas.

Como exemplo para obter esquemas de controle inteligente é usada a função `CheckControls` e outros métodos da interface `Solution` junto com a interface `CtrlQueue`. Porém a análise desses esquemas de controle inteligente fogem do escopo deste trabalho. Os detalhes podem ser encontrados nas notas técnicas do *OpenDSS*.

5. VISUALIZAÇÃO DE RESULTADOS E GERAÇÃO DE RELATÓRIOS DE SAÍDA DO OPENDSS

Os resultados obtidos podem ser visualizados de diversas formas. Após a realização de uma simulação pode-se visualizar o resultado através do menu *Show* onde estarão presentes as opções:

- Summary
- Voltages
- Currents
- Powers
- Buses
- BusFlow...
- Converged
- Elements
- Elements in Class
- Energy Meters
- Event Log
- Generators
- Isolated
- Losses
- kV Base Mismatch
- Line Constants...
- Loops
- Mismatch
- Taps
- Monitor [monitor]
- Zone [meter]
- Zone [meter] Treeview
- List...

Acessando qualquer uma das informações através do menu *Show* será gerado um relatório em arquivo *.txt* (Figura 59).

alimentadorcigre_VLL_Node.Txt - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

LINE-LINE VOLTAGES BY BUS & NODE

Bus	Node	VLN (kV)	Angle	pu	Base kV
0 ..	1-2	114.43 /_	-0.4	0.995	115.000
	- 2-3	114.41 /_	-120.4	0.9949	115.000
	- 3-1	114.44 /_	119.6	0.99511	115.000
1 ..	1-2	12.21 /_	21.5	0.97919	12.470
	- 2-3	12.233 /_	-98.2	0.98096	12.470
	- 3-1	12.281 /_	141.6	0.98486	12.470
12 .	1-2	12.691 /_	27.0	1.0177	12.470
	- 2-3	12.692 /_	-93.0	1.0178	12.470
	- 3-1	12.693 /_	147.0	1.0179	12.470
2 ..	1-2	11.997 /_	20.7	0.96206	12.470
	- 2-3	12.029 /_	-99.0	0.96464	12.470
	- 3-1	12.078 /_	140.7	0.96858	12.470
3 ..	1-2	11.869 /_	20.1	0.95184	12.470
	- 2-3	11.892 /_	-99.5	0.95365	12.470
	- 3-1	11.957 /_	140.2	0.95885	12.470
4 ..	1-2	11.839 /_	20.0	0.94942	12.470
	- 2-3	11.862 /_	-99.6	0.95128	12.470
	- 3-1	11.933 /_	140.1	0.95697	12.470
5 ..	1-2	11.821 /_	19.8	0.94794	12.470
	- 2-3	11.84 /_	-99.7	0.94945	12.470
	- 3-1	11.919 /_	140.0	0.95578	12.470

Figura 59: Relatório das tensões L-L obtidas no circuito através do menu Show

Outra opção para a obtenção de resultados no *OpenDSS* é através do menu *Export*, com as seguintes opções:

- Result
- Voltages
- Currents
- Powers
- Losses
- Summary
- Buscoords
- Fault Currents
- Capacity
- Overloads
- Unserved

- Generators
- Loads
- Node Names
- Node Order
- Meters
- Estimation
- Monitors...
- Yprim
- Y
- Seq Z

Element	Nterminals	Nconductors	P_1	Q_1	...	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Vsource.source	2	3	-6226.11	-4725.75	-6262.85	-5066.55	-5947.55	-4930.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transformer.trafo1	2	4	6142.86	3922.93	6187.75	4256.59	5874.85	4130.8	0	0	-6373.67	-3403.57	-6108.23	-3284.99	-5716.74	-3233.9	0	0	0
Transformer.trafo2	2	4	832.462	802.825	751.032	809.958	727.072	799.364	0	0	-783.979	-798.03	-730.362	-795.725	-79.524	-783.899	0	0	0
Transformer.reg1	2	4	-2677.36	-866.644	-2634.81	-818.574	-2656.04	-864.754	0	0	2687.96	893.141	2645.41	845.075	2666.64	891.258	0	0	0
Transformer.reg2	2	4	-2702.44	-866.724	-2652.34	-856.461	-2617.34	-836.442	0	0	2711.76	890.01	2661.65	879.752	2626.65	859.729	0	0	0
Line.linha1	2	3	-956.529	484.239	-693.972	213.129	-935.465	79.575	961.339	-37.454	694.947	-208.7	940.011	-717.922					
Line.linha2	2	3	-1475.62	-189.338	-997.448	350.531	-1385.01	-148.693	1484.32	211.685	998.818	-287.719	1393.98	163.604					
Line.linha3	2	3	-2141.36	-530.418	-1980.04	-427.132	-2228.1	-579.523	2153.13	556.075	1988.76	445.568	2238.82	606.442					
Line.linha4	2	3	-2333.13	-643.253	-2078.76	-489.157	-2328.82	-650.031	2346.26	671.654	2086.92	507.82	2339.73	676.332					
Line.linha5	2	3	-2578.76	-760.443	-2506.2	-703.37	-2382.23	-702.671	2628.94	850.729	2539.81	787.349	2406.71	774.576					
Line.linha7	2	3	-95	-31.225	-190	-62.45	-95	-31.225	951.104	309.614	190.309	628.363	949.794	310.146					
Line.linha8	2	3	405.601	192.449	408.074	185.823	448.258	220.808	-405.353	-191.973	-407.815	-185.395	-448.007	-220.174					
Line.linha9	2	3	310.353	160.748	265.315	138.558	353.007	188.949	-310.068	-160.063	-265.034	-138.269	-352.523	-187.974					
Line.linha10	2	3	175.068	946.795	175.034	946.804	127.523	790.014	-175	-946.299	-175	-946.299	-127.5	-790.174					
Line.linha12	2	3	593.034	270.733	737.227	320.726	725.117	346.124	-590.712	-267	-733.383	-314.043	-723.237	-339.001					

Figura 60: Relatório das correntes por fase nos elemento do circuito obtido através do menu Export

Acessando qualquer uma das informações através do menu *Export* será gerado um relatório em arquivo .csv localizado na pasta onde está o arquivo .dss em estudo.

As formas de obtenção de resultados citadas anteriormente apresentam valores para todos os elementos do sistema. Uma forma simples de acessar informações a respeito das correntes, tensão e potência por fase em algum elemento é através da aba Visualize, Figura 61.

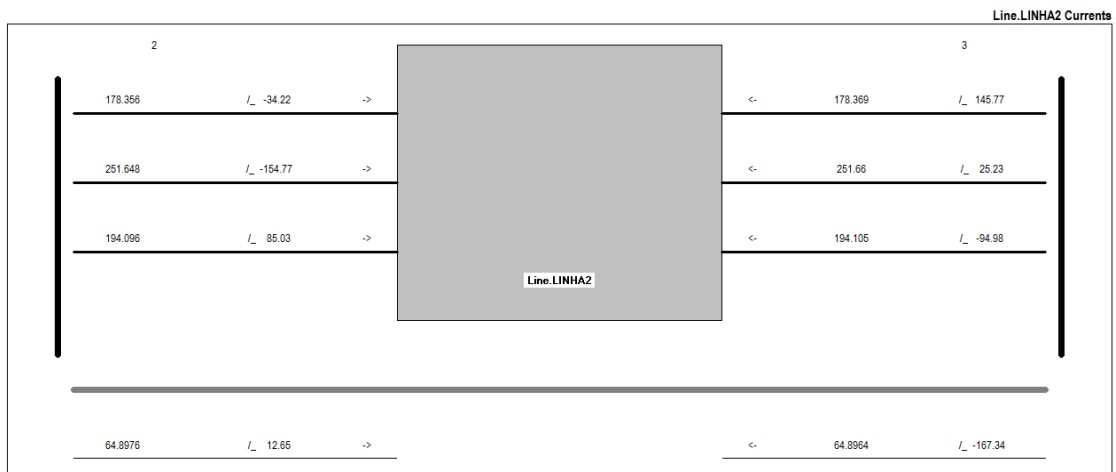


Figura 61: Relatório das correntes por fase no elemento Line.LINHA2 através da aba Visualize

Há também a opção de obter os resultados através dos comandos do menu *Plot*. Através do seu uso pode-se obter gráficos para potência, corrente, tensão, perdas e capacitância ao longo do alimentador. O menu *plot* pode ser acessado através da interface do *OpenDSS* ou também pode ser inicializado por linhas de comando, da seguinte forma:

```
plot loadshape object=myloadshape % PLOTAR O PERFIL DE TENSÃO APRESENTADO PELO OBJETO
myloadshape
```

Figura 62: Comandos utilizados para obtenção do gráfico com perfil de tensão (SEXAUER, 2012)

É imprescindível que para obter o gráfico de perfis de tensão, corrente ou potência através do menu *Plot* haja um objeto de medição chamado *Energy Meter* na saída da subestação.

Todos os métodos citados anteriormente para a obtenção dos relatórios de saída podem ser empregados também via MATLAB, onde poderão ser empregadas melhorias ou outras formas de visualização.

6. RESULTADOS

6.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA-TESTE PARA A REALIZAÇÃO DE ESTUDOS COM O *OPENDSS*

O sistema-teste a ser usado nos estudos de caso deste trabalho é uma Rede de Distribuição de Média Tensão com a configuração norte-americana. Tal sistema-teste foi criado pelo CIGRÉ para a simulação de métodos e estudos de software.

Os alimentadores de distribuição de média tensão nos Estados Unidos são trifásicos com estruturas tanto radiais quanto em malha, com predomínio de instalações rurais. O sistema-teste permite uma flexibilidade entre a estrutura em malha e a estrutura radial. Em cada alimentador há diversas derivações onde podem ser conectados os transformadores de MT/BT. Nos Estados Unidos, estruturas radiais são predominantes, e as linhas monofásicas de média tensão são incluídas como subredes das linhas trifásicas. A tensão nominal na seção trifásica é 12,47 kV, e nas seções monofásicas a tensão de fase é 7.2 kV. A frequência do sistema é igual a 60 Hz.

Em relação à simetria da configuração norte-americana, devido a existência de linha monofásicas, a rede é inerentemente desbalanceada. Embora o esforço para o balanceamento de carga feito, não se deve considerar a rede trifásica como sendo balanceada, particularmente para estudos de queda de tensão.

No que se trata aos tipos de linhas, são usados cabos condutores nus de alumínio com reforço de aço (CAA), ou condutores nus de alumínio (CA).

O aterramento da rede de média tensão depende muito da região de preferência. A maioria da rede americana é aterrada (CIGRÉ, 2014).

6.1.1. Topologia do sistema-teste

A topologia da Rede de Distribuição de Média Tensão com a configuração norte-americana está demonstrada na Figura 63. Emoldurado por linhas tracejadas estão os alimentadores 1 e 2. Ambos operam com tensão nominal de 12.47 kV e são alimentados por diferentes transformadores através de um sistema de distribuição em alta tensão de 115 kV. Qualquer variação da topologia pode ser feita configurando as chaves *S1*, *S2* e *S3*. Se as três chaves estão abertas, então os dois alimentadores operam de forma radial. Fechando a chave *S2* e *S3* cria-se um loop no alimentador 1. Fechando a chave *S1* os dois alimentadores estarão conectados por uma linha de distribuição.

Além das linhas trifásicas, a rede norte-americana contém linhas monofásicas. Para esses casos a subrede monofásica está demonstrada na Figura 64. Essas subredes são alocadas na rede de média tensão da maneira como está demonstrado na Figura 63 (CIGRÉ, 2014).

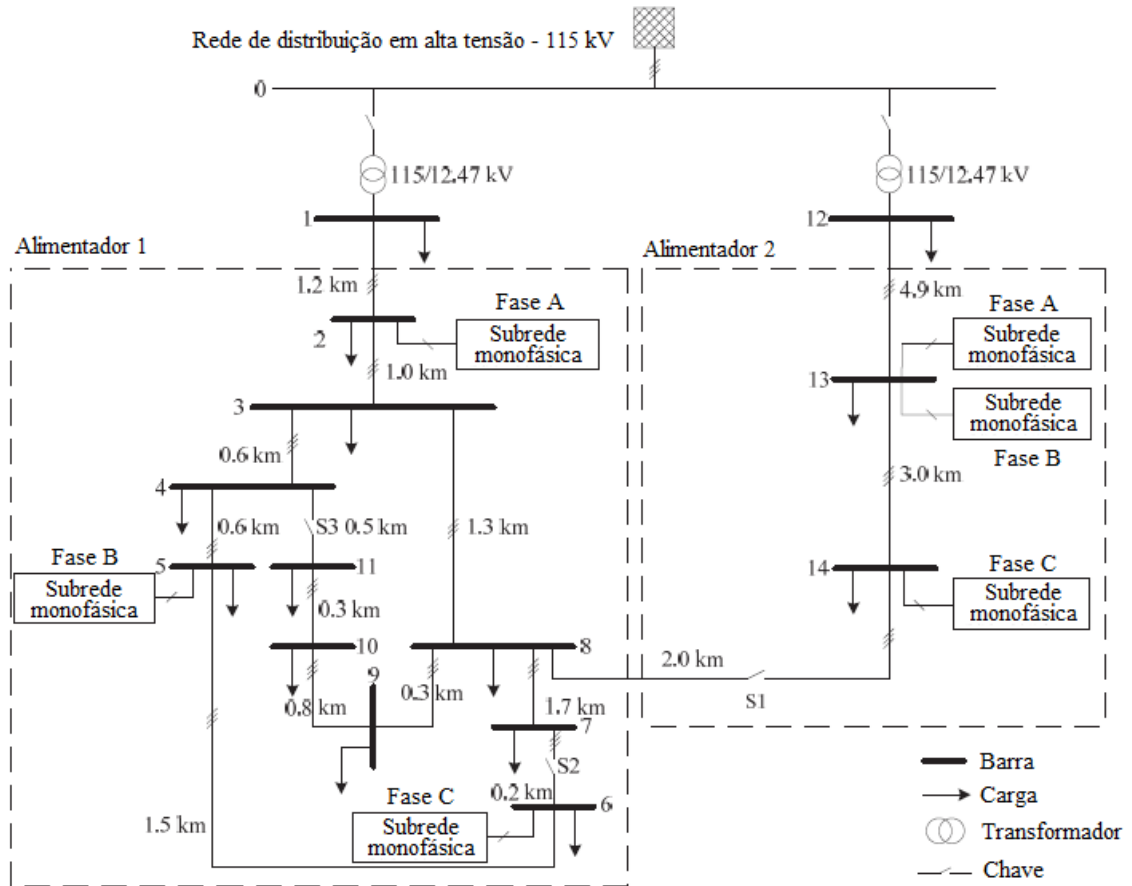


Figura 63: Topologia da seção trifásica do sistema-teste

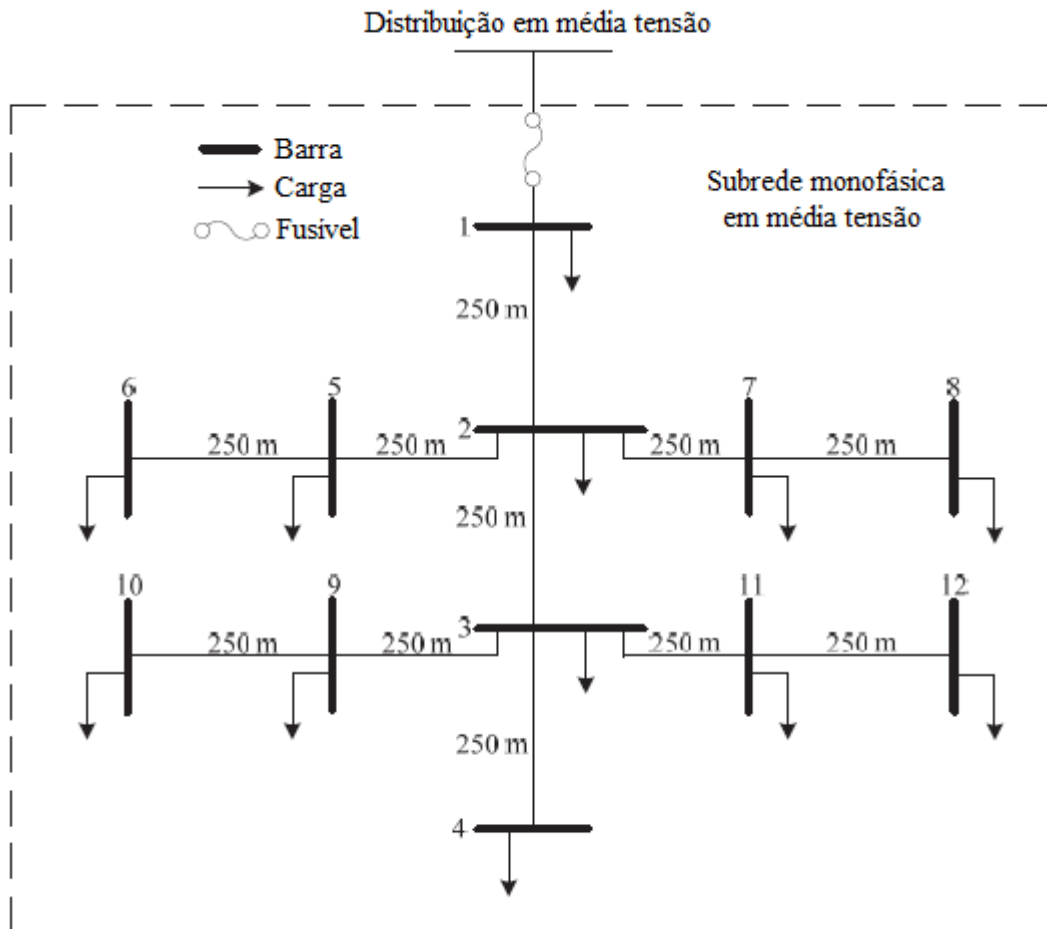


Figura 64: Topologia da seção monofásica do sistema-teste

6.1.2. Dados da rede

Na configuração norte-americana os condutores são colocados em postes como linhas aéreas. Cabos de neutro estão presentes em seções trifásicas e monofásicas. A Figura 65 e a Tabela 3 fornecem as geometrias dos postes tanto para linhas trifásicas e monofásicas. Os tipos de condutores usados no sistema-teste estão disponíveis nas informações de condutores. Os parâmetros dos condutores estão apresentados na Tabela 4 (CIGRÉ, 2014).

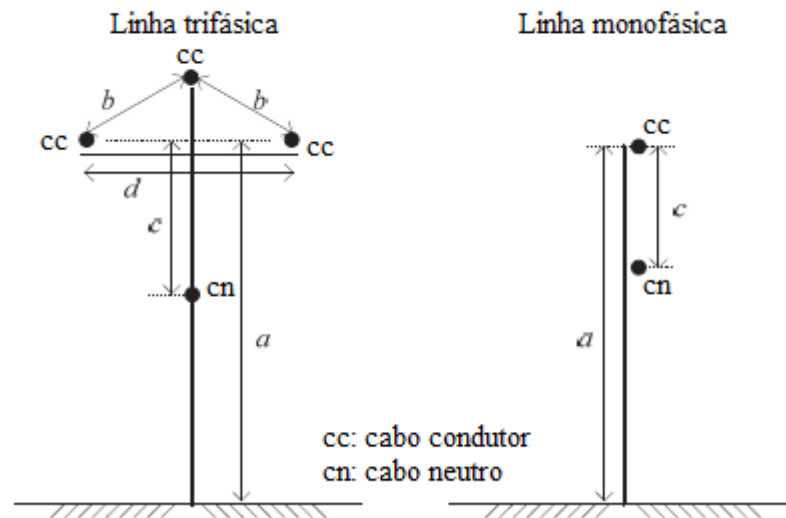


Figura 65: Geometria das linhas aéreas do sistema-teste

Tabela 3: Dados da geometria das linhas aéreas do sistema-teste

Poste	a	b	c	D
	[m]	[m]	[m]	[m]
Three-phase	13,7	1,64	2,13	3,05
Single-phase	13,7	N/A	2,13	N/A

Tabela 4: Parâmetros dos condutores do sistema-teste

ID do Conductor	Função	Tipo	Tamanho	d_c	GMR	R'_{ac} em 20°C	R'_{ac} em 50°C
			[kcmil or AWG]	[cm]	[cm]	[Ω/km]	[Ω/km]
1	Cabo do condutor	AAC "Tulip"	336,4	1,69	0,640	0,168	0,190
2	Cabo do neutro	AAC "Phlox"	3/0	1,18	0,427	0,338	0,380
3	Conductor e neutro	ACSR "Sparrow"	2	0,80	0,140	0,832	1,010

A Tabela 5 define a topologia da rede, tamanho das linhas da seção trifásica da Figura 63 e o tipo de instalação. Ela também fornece a resistência, reatância e susceptância de sequência de fase e zero para cada linha. Na Tabela 6 as seções monofásicas são descritas da mesma maneira.

Tabela 5: Conexões e parâmetros das linhas da seção trifásica do sistema-teste

Linha	Nó inicial	Nó final	ID do Condutor	R'_{ph}	X'_{ph}	B'_{ph}	R'_0	X'_0	B'_0	l	Instalação
				[Ω /km]	[Ω /km]	[μ S/km]	[Ω /km]	[Ω /km]	[μ S/km]	[km]	
1	1	2	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	1,20	Aérea
2	2	3	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	1,00	Aérea
3	3	4	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	0,61	Aérea
4	4	5	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	0,56	Aérea
5	5	6	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	1,54	Aérea
6	6	7	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	0,24	Aérea
7	7	8	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	1,67	Aérea
8	8	9	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	0,32	Aérea
9	9	10	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	0,77	Aérea
10	10	11	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	0,33	Aérea
11	11	4	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	0,49	Aérea
12	3	8	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	1,30	Aérea
13	12	13	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	4,89	Aérea
14	13	14	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	2,99	Aérea
15	14	8	1,2	0,282	0,703	3,193	0,466	1,243	1,826	2,	Aérea

Tabela 6: Conexões e parâmetros das linhas da seção monofásica do sistema-teste

Linha	Nó inicial	Nó final	ID do Condutor	R'_{ph}	X'_{ph}	B'_{ph}	l	Instalação
				[Ω /km]	[Ω /km]	[μ S/km]	[m]	
1	1	2	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
2	2	3	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
3	3	4	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
4	2	5	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
5	5	6	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
6	2	9	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
7	9	8	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
8	8	7	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
9	9	10	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
10	10	11	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea
11	9	4	3	1,144	0,884	2,374	250	Aérea

A Tabela 7 fornece os valores do pico de carga por fase para cada nó da seção trifásica. A Tabela 8 fornece os valores do pico de carga por fase para as subredes monofásicas residenciais.

Tabela 7: Parâmetros das cargas da seção trifásica

Nod e	Potência aparente, $S[kVA]$						Fator de potência, fp	
	Fase A		Fase B		Fase C		Residenci al	Comerci al ou Industrial
	Residencial	Comerci al ou Industrial	Residenci al	Comerci al ou Industrial	Residenci al	Comerci al ou Industrial		
1	5010	3070	4910	2570	3860	3520	0,93	0,87
2	100+Subred e	200	50	300	200	300	0,95	0,85
3	---	80	200	80	50	80	0,90	0,80
4	200	---	100	---	100	---	0,90	---
5	200	50	Subrede	200	---	50	0,95	0,85
6	50	---	100	---	Subrede	---	0,95	---
7	---	100	100	100	---	100	0,95	0,95
8	100	---	150	---	---	200	0,90	0,90
9	100	---	150	---	100	---	0,95	---
10	150	---	100	---	250	---	0,90	---
11	50	150	50	150	---	150	0,95	0,95
12	1060	1260	1060	1260	1060	1260	0,90	0,87
13	Subrede	225	Subrede	225	---	225	0,95	0,85
14	---	90	---	90	Subrede	90	0,90	0,90

Tabela 8: Parâmetros das cargas da seção monofásica

Node	Potência aparente, S	Fator de potência, fp
	[kVA]	
1	15	0,90
2	15	0,95
3	15	0,90
4	15	0,90
5	10	0,95
6	50	0,95
7	50	0,95
8	10	0,95
9	50	0,95
10	15	0,90
11	10	0,95
12	10	0,95

6.2. CADASTRO DE DADOS DO SISTEMA-TESTE NO OPENDSS

Através das informações apresentadas anteriormente é possível cadastrar no *OpenDSS* a geometria dos condutores da seguinte forma:

```
! Cadastrando dados do condutor 1 (Fase)
New wiredata.phase GMR=0.640 DIAM=1.69 RAC=0.190 RDC=0.168 ! Cadastrando dados do condutor 1
~ normamps=495
~ runits=km radunits=cm gmrunits=cm
```

Figura 66: Cadastro de um tipo de condutor

O comando *New wiredata.phase* cria um condutor, a seguir o comando *GMR* é usado para cadastrar o valor para *Geometry mean radius (GMR)*, apresentado na Tabela 4. O comando *DIAM* é utilizado para cadastrar o diâmetro do tipo de cabo utilizado, *RAC* indicará a resistência/unidade em corrente alternada do cabo e *RDC* a resistência/unidade em corrente contínua. O comando *~normamps* é usado para escolher os valores da capacidade de corrente do cabo e por fim os comandos *~runits*, *radunits* e *gmrunits* são usados para indicar as unidades do diâmetro do cabo, unidade para *RAC* e *RDC* e *GMR*.

O cadastrado da geometria dos postes de acordo com a Figura 65 e Tabela 3 é realizada como segue:

```
! Cadastrando a geometria dos postes da seção trifásica
New linegeometry.pole1 nconds=4 nphases=3 reduce=yes
~ cond=1 wire=phase x=-1.525 h=13.7 units=m
~ cond=2 wire=phase x=0 h=14.3 units=m
~ cond=3 wire=phase x=1.525 h=13.7 units=m
~ cond=4 wire=neutral x=0 h=11.57 units=m
```

Figura 67: Cadastro da geometria da seção trifásica

Para o cadastro do tipo de geometria da linha é usada o comando *new linegeometry*, *nconds* indica o número de condutores da geometria, no caso 3 fases mais um neutro, no total 4 condutores. Para indicar o número de fases é usado o comando *nphases* e para aplicar a redução de matriz usa-se o comando *reduce=yes*.

O comando *~cond* é usado para iniciar o cadastro dos dados de um dos condutores, escolhendo o tipo de cabo, a distância do polo do condutor à referência no eixo x e y são indicados pelos comandos x e h, respectivamente. Por fim, é usado o comando *units* para indicar qual a unidade de medida da geometria.

Através das informações cadastradas para os dados dos condutores e geometria dos postes é possível cadastrar as linhas de acordo com os dados fornecidos na Tabela 5 e 6, como exemplo segue:

```
! Cadastrando linha trifásica
new line.linha1 bus1=1 bus2=2
~ length=1.2 units=km
~ Geometry=pole1
~ EarthModel=Carson
```

Figura 68: Cadastro de um linha trifásica

Para cadastrar uma linha é usado o comando *newline.linha1, bus1* em qual barra a linha está conectada primeiramente, *bus2* indica em qual barra estará conectada o outro terminal da linha. O comando *~length* é usado para indicar o tamanho da linha e *units* a unidade de medida da linha; *~Geometry* indicará o tipo de geometria da linha e por fim o comando *~EarthModel* é usado para indicar que o neutro está aterrado e então é usada a redução da matriz por Carson de 4x4 para 3x3.

Na Tabela 9 estão apresentados os parâmetros dos transformadores da subestação. Os transformadores delta-estrela são os mais comuns nos Estados Unidos com o ângulo em delta adiantado em relação ao em estrela.

Tabela 9: Parâmetros dos transformadores do sistema-teste

Nó inicial	Nó final	Conexão	V_1	V_2	Z_{tr}	S_{base}
			[kV]	[kV]	[Ω]	[MVA]
0	1	Δ - $Y_{aterrado}$	115	12,47	0,010+j1,24	15
0	12	Δ - $Y_{aterrado}$	115	12,47	0,013+j1,55	12

Para o cadastro dos transformadores da subestação de média tensão, de acordo com a Tabela 9, são utilizados os seguintes comandos:

```
! Cadastrando os dado do transformador da subestação do Alimentador 01
new transformer.trafo1 phases=3 windings=2 sub=yes %Rs=[0.010 0.010] xht=1.24
~ wdg=1 bus=0 conn=delta kV=115 kVa=15000 NumTaps=4 Maxtap=1.05 Mintap=0.95 tap=1.025
~ wdg=2 bus=1 conn=wye kV=12.47 kVa=15000 NumTaps=32 Maxtap=1.1 Mintap=0.9 leadlag=lead tap=1.09375
```

Figura 69: Cadastro do transformador da subestação

Para criar o elemento transformador é usado o comando *new transformer.trafo1*, depois escolhe-se o número de fases através de *phases* para selecionar o número de espiras do transformador usa-se o comando *windings*. Para o exemplo é usado o comando *sub* para indicar se o transformador é da subestação ou não, o caso *Yes*, para indicar que ele é sim um transformador presente na subestação.

Para especificar os parâmetros da impedância do transformador são usados os comando *%Rs* e *XHT*.

O comando *~wdg* inicia o cadastro de dados em cada espira do transformador. O comando *bus* é usado para indicar em qual barra do sistema está conectada a espira, *conn* é usado para indicar qual o tipo de conexão é usado na espira, *kV* indica a tensão nominal no lado da espira e *kVA* a potência aparente do transformador. Pode-se usar o comando *leadlag* para indicar se o lado da espira em questão está adiantado ou atrasado em relação ao outro lado. Os comando *NumTaps*, *MaxTap*, *MinTap* e *Tap*, indicam, na sequência: o número de taps que possui a espira do trafo, o máximo de valor em p.u que o tap pode alcançar, o mínimo de valor em p.u que o tap pode alcançar e tap o valor escolhido em p.u para o *tap*.

A Tabela 10 traz os parâmetros relativos ao sistema de distribuição em alta-tensão do sistema-teste.

Tabela 10: Parâmetros do sistema de distribuição em alta tensão do sistema-teste

Tensão nominal do sistema	Potência de curto-circuito, S_{sc}	Razão R/X
[kV]	[MVA]	0,1
115	5000	

**! Cria um equivalente de Thévenin para o sistema de distribuição em alta tensão
new object=circuit.alimentadorcigre**

Edit Vsource.source basekV=115 bus1=0 pu=1.0 x1r1=10 MVAsc3=5000 angle=-30

Figura 70: Cadastro do sistema de distribuição em alta tensão

O comando *new object* é usado para criar um objeto de nome *circuit.alimentadorcigre* que representará o equivalente de Thévenin do sistema de distribuição em alta tensão. O comando *Edit Vsource.source* é usada para definir os valores da fonte de tensão do sistema, no caso o objeto criado de nome *circuit.alimentadorcigre*. O comando *basekV* é usado para definir a tensão de base da fonte, p.u vai indicar o quanto da tensão de base estará operando, ou seja, com p.u igual a 1 e *basekV* igual a 115, tem-se que o circuito opera na tensão de 115 kV. *MVAsc3=5000* define o valor para a potência aparente de curto-circuito e por fim o comando *angle=-30* define o ângulo da primeira fase da barra da fonte.

De acordo com os dados apresentados nas Tabelas 7 e 8 é possível cadastrar tanto as cargas monofásicas e as trifásicas. Como exemplo, segue:

! CADASTRANDO DAS CARGAS NA BARRA 1

```
new load.carga1ra phases=1 bus=1.1 kVa=5010 pf=0.93 kV=7.19
new load.carga1rb phases=1 bus=1.2 kVa=4910 pf=0.93 kV=7.19
new load.carga1rc phases=1 bus=1.3 kVa=3860 pf=0.93 kV=7.19
```

```
new load.carga1ca phases=1 bus=1.1 kVa=3070 pf=0.87 kV=7.19
new load.carga1cb phases=1 bus=1.2 kVa=2570 pf=0.87 kV=7.19
new load.carga1cc phases=1 bus=1.3 kVa=3520 pf=0.87 kV=7.19
```

Figura 71: Cadastro de um carga trifásica

O comando *new load.carga1ra* cadastra uma carga de nome *carga1ra*, depois é usado o comando *phases* para indicar o número de fases que a carga possui, *kVa* indica qual a potência aparente da carga, *pf* o fator de potência do elemento e por fim *kV* indica a tensão nominal na carga.

6.3. CASOS DE ESTUDO - FLUXO DE POTÊNCIA

Os estudos de fluxo de potência foram realizados no sistema-teste apresentado na seção 6.1 com dois alimentadores operando na configuração radial. Para as finalidades dos casos de estudo, foi escolhido o modo de operação padrão de resolução de fluxo de potência do *OpenDSS*, através do comando *set mode=SnapShot*.

6.3.1. Definição dos casos de estudo

a) Inserção de bancos capacitores no sistema-teste via MATLAB

É prática comum das distribuidoras de energia elétrica o uso de banco capacitores trifásicos em redes de distribuição visando a melhoria do nível de tensão no trecho do alimentador, oferecendo uma melhora na qualidade de energia elétrica entregue aos seus clientes.

Para análise do nível de tensão no Alimentador 01 e Alimentador 02 do sistema-teste do Cigré foram instalados dois medidores de energia conectados nos terminais dos transformadores da subestação de média tensão para que assim fosse possível uma análise da queda de tensão de acordo com a distância do trecho para a subestação. Foram usados os seguintes comandos no software *OpenDSS*:

```
new energymeter.medidorAL01 element=transformer.trafo1 terminal=1 !Cria um medidor de energia no
transformador responsável pelo Alimentador 01 da subestação de média tensão
```

```
new energymeter.medidorAL02 element=transformer.trafo2 terminal=1 !Cria um medidor de energia no
transformador responsável pelo Alimentador 02 da subestação de média tensão
```

Figura 72: Cadastro dos medidores na saída da subestação

O comando *new energymeter.medidor AL01* cria um elemento *Energy Meter*, o comando *element* é usado para identificar em qual elemento o medidor deve estar conectado e para especificar o terminal é usando o comando *terminal*.

Com os medidores de energia instalados na saída da subestação é possível criar no *MATLAB* um vetor com as distâncias de cada barra para a subestação. De acordo com os comandos a seguir:

```
DistA = DSSCircuit.AllNodeDistancesByPhase(1); % Cria um vetor com as
distâncias dos nós da fase A(1) para a subestação
DistB = DSSCircuit.AllNodeDistancesByPhase(2); % Cria um vetor com as
distâncias dos nós da fase A(2) para a subestação
DistC = DSSCircuit.AllNodeDistancesByPhase(3); % Cria um vetor com as
distâncias dos nós da fase A(3) para a subestação
```

Figura 73: Criando vetores para armazenar os valores das distâncias por fase

O vetor *DistA* é criado para armazenar os valores das distâncias das barras para a subestação, para obter essas distâncias é usado o comando *DSSCircuit.AllNodeDistanceByPhase*.

Para obter os valores da tensão em p.u por fase nas barras do sistema são criados os seguintes vetores no *MATLAB*:

```
VA = DSSCircuit.AllNodeVmagPUByPhase(1); % Cria um vetor que armazena os
valores de tensão na fase A(1)
VB = DSSCircuit.AllNodeVmagPUByPhase(2); % Cria um vetor que armazena os
valores de tensão na fase B(2)
VC = DSSCircuit.AllNodeVmagPUByPhase(3); % Cria um vetor que armazena os
valores de tensão na fase C(3)
```

Figura 74: Criando vetores para armazenar os valores das tensões por fase

O vetor *VA* é criado para armazenar os valores das tensões por fase nas barras, para obter essas tensões é usado o comando *DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase*.

A inserção dos bancos capacitores no Alimentador 01 aconteceu através da interface do *MATLAB*, através dos comandos:

```
DSSText.Command = 'New capacitor.cap2 bus1=3 phases=3 kVAr=600'; %O
comando DSSText.Command é usado para utilizar a interface Text que
permite no caso, o usuário criar um elemento no caso do tipo capacitor. O
comando bus1=3 indica que ele está conectado na barra 3 e especifica-se
sua potência reativa nominal através do comando kVAr=600
```

Figura 75: Cadastro do elemento capacitor

Dessa forma, são adicionados capacitores trifásicos com potência nominal reativa de 600 kVAr nas barras 3,5,7,9 e 11 do sistema-teste. Os gráficos gerados para análise da presença de banco de capacitores, foram implementados em *MATLAB* da seguinte forma:

```
DistA1=sort(DistA(1:12)); % Vetor que armazena os 12 primeiros valores do
vetor DistA em ordem crescente
DistB1=sort(DistB(1:12)); % Vetor que armazena os 12 primeiros valores do
vetor DistB em ordem crescente
DistC1=sort(DistC(1:12)); % Vetor que armazena os 12 primeiros valores do
vetor DistC em ordem crescente
```

Figura 76: Criando vetores para armazenar os valores das distâncias das barras do alimentador 1 para a subestação

O vetor *DistA1* é criado para armazenar os valores das distâncias das barras do alimentador 1 para a subestação em ordem crescente. Para isso foi usado o comando *sort* e escolhido os valores entre 1 e 12 do vetor *DistA*.

```
VA1=VA(1:12); % Vetor que armazena os 12 primeiros valores do vetor VA
VB1=VB(1:12); % Vetor que armazena os 12 primeiros valores do vetor VB
VC1=VC(1:12); % Vetor que armazena os 12 primeiros valores do vetor VC
```

Figura 77: Criando vetores para armazenar os valores das tensões nas barras do alimentador 1

O vetor *VA1* é criado para armazenar os valores das tensões nas barras do Alimentador 1. Para isso foi usado o comando *sort* e escolhido os valores entre 1 e 12 do vetor *DistA*.

```

figure
plot(DistA1,VA1,'r'); %plota os valores do vetor DistA1 no eixo x e o
valores do vetor VA1 no eixo y, gerando uma curva de cor vermelha.
hold on;
plot(DistB1,VB1,'b'); %plota os valores do vetor DistA1 no eixo x e o
valores do vetor VA1 no eixo y, gerando uma curva de cor azul.
hold on;
plot(DistC1,VC1,'g'); %plota os valores do vetor DistA1 no eixo x e o
valores do vetor VA1 no eixo y, gerando uma curva de cor verde.
hold on;
grid on;
ylim([0.9 1.02]);
hold off
xlabel('Distância para a SE01 (km)');
ylabel('Tensão nominal (p.u)');

```

Figura 78: Comandos utilizados para plotagem dos gráficos

A análise do nível de tensão no Alimentador 01 pode ser verificada através das Figuras 79 e 80.

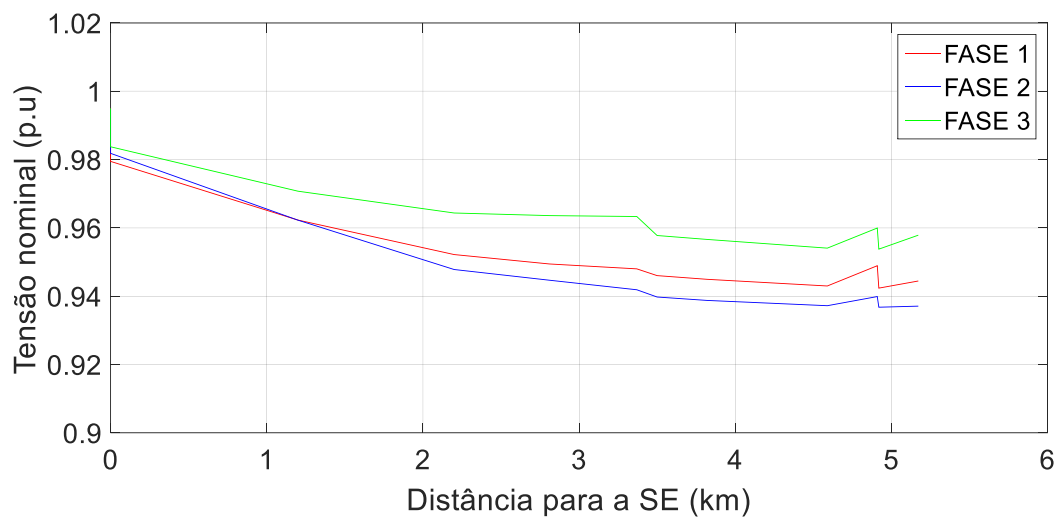


Figura 79: Nível de tensão no Alimentador 01 – Operação Normal

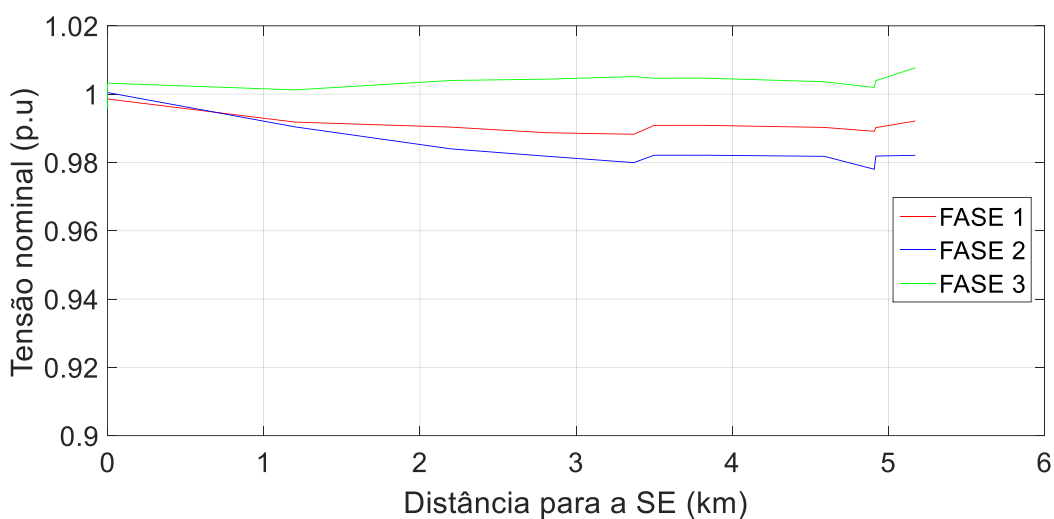


Figura 80: Nível de tensão no Alimentador 01 – Após a inserção dos bancos de capacitores

É possível verificar que em operação normal, Figura 79, o nível de tensão no Alimentador 01 apresenta uma queda de 0,04 à 0,06 p.u. Para diminuir os efeitos dessa queda são acrescentados os bancos de capacitores trifásicos, apresentando como resultado a Figura 80, onde verifica-se que há uma linearidade maior no nível de tensão no decorrer do alimentador, onde a maior queda de tensão agora é de 0,02 p.u na FASE 2.

As variações de tensões repentinas apresentadas, tanto na Figura 79 e 80 deve-se ao fato de que o Alimentador 01 no decorrer do seu trecho é dividido em duas partes que não são interconectadas entre si (apesar da configuração do sistema permitir que isso aconteça através da chave S2 e S3), são ligadas somente a uma barra específica. Desta forma, o gráfico apresenta essa variação repentina quando são mostradas tensões associadas com barras pertencentes a lados distintos do alimentador.

Para a análise do Alimentador 02 foi verificado de acordo com a Figura 81 que a queda de tensão, em operação normal, não possui magnitudes tão consideráveis quanto as apresentadas para o Alimentador 01 em operação normal, sendo assim não há necessidade de inserção de bancos de capacitores trifásicos.

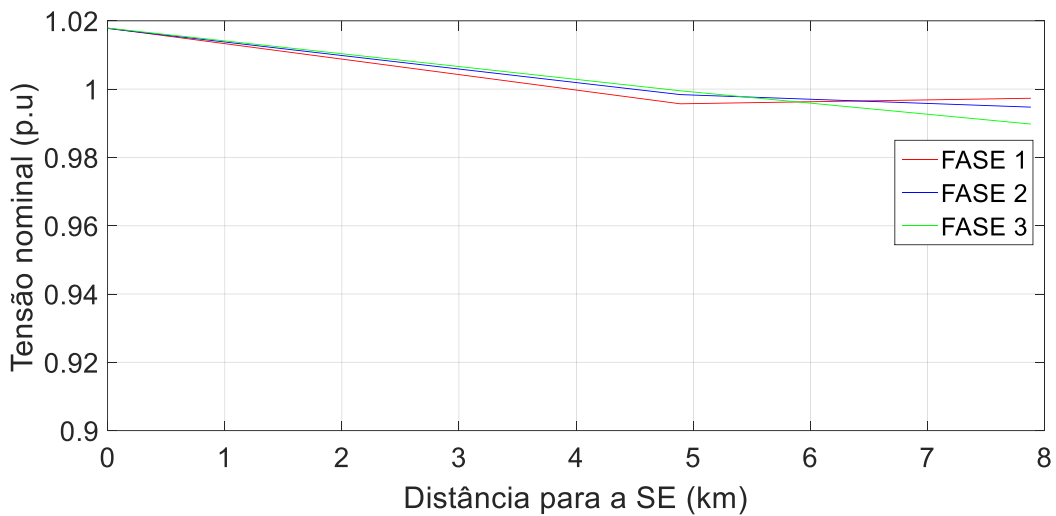


Figura 81: Nível de tensão no Alimentador 02 – Operação Normal

É possível analisar que a queda de tensão não alcança uma magnitude de 0,02 p.u, apresentando uma boa estabilidade do nível de tensão, apesar do fato do Alimentador 02 possuir um trecho mais longo que o Alimentador 01.

b) Inserção de uma GD no sistema-teste

Outro ponto muito importante do estudo em sistemas de distribuição é em relação a inserção de GD's. Essa é uma demanda que já vem há anos pelo mundo, tanto é que foi motivo para a criação do *OpenDSS*. Porém no Brasil, foi nessa década com o crescimento do uso de energias alternativas, mudanças na legislação e um consumidor cada vez mais preocupado com o que gasta de energia; é que o conceito de *GD* se tornou mais popular.

Para o Alimentador 01 foi cadastrada uma GD através do *script* do software *OpenDSS*, da seguinte forma:

```
! Definindo a GD
new generator.gen1 bus1=7 kV=12.47 kW=5000 pf=0.98 conn=delta model=1 status=fixed enabled=yes
```

Figura 82: Cadastrando uma GD para o Alimentador 01

Para a *GD* do Alimentador 01 foi escolhido a variável *status=fixed*, isso significa que ela está sempre funcionando a plena carga com um potência nominal de 5000 kW. A *GD* foi conectada à barra 07, pois este é o ponto mais distante da subestação, onde há a menor tensão do alimentador. A seguir a comparação do nível

de tensão com o Alimentador 01 operando normalmente e após a inserção da *GD*. A metodologia empregada para a plotagem dos gráficos foi apresentada anteriormente neste trabalho usando o software *MATLAB*.

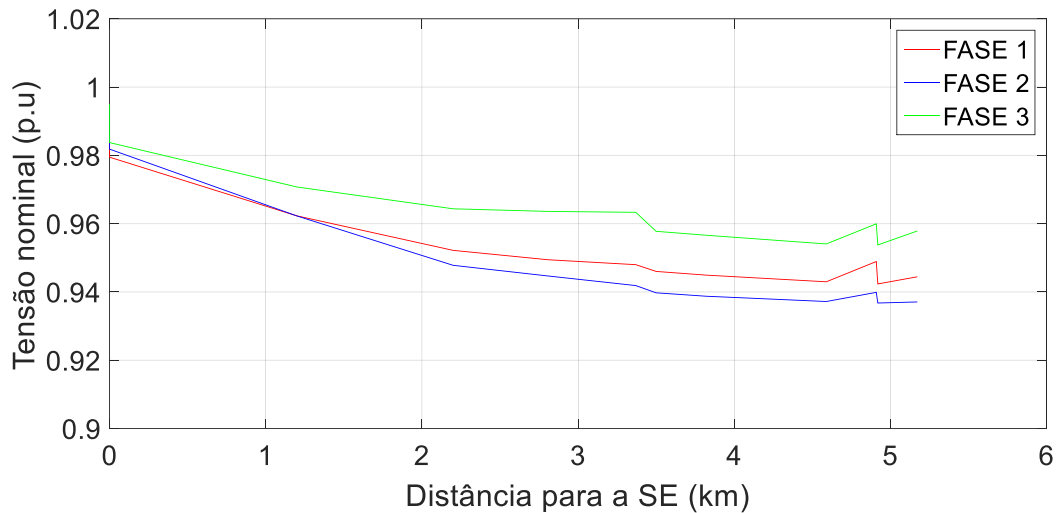


Figura 83: Nível de tensão no Alimentador 01 – Operação Normal

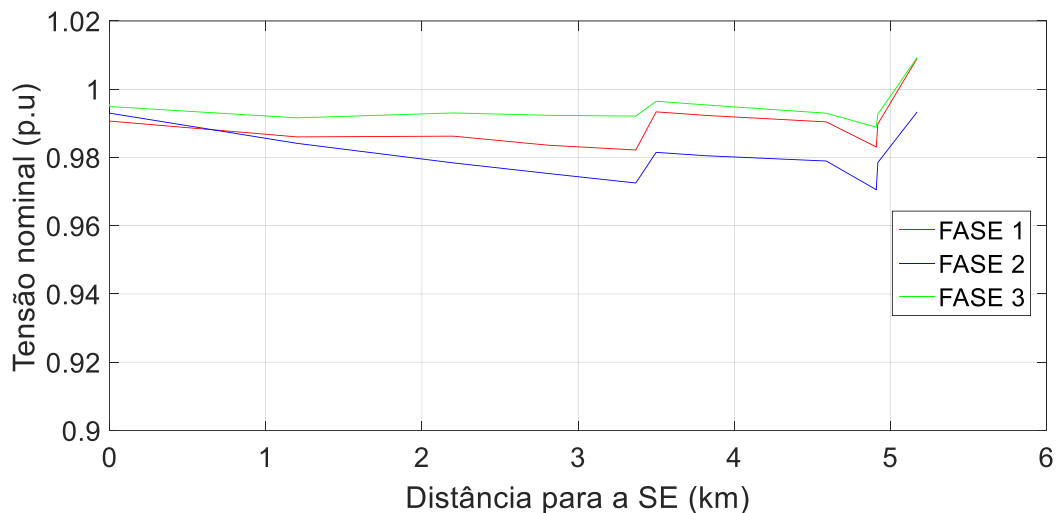


Figura 84: Nível de tensão no Alimentador 01 – Após a inserção da GD

É possível verificar na Figura 84 que a inserção da GD fez com que os valores de queda de tensão não fossem tão altos quanto os apresentados em operação normal. No trecho onde está conectada a GD os níveis de tensão são mais altos, já que seu efeito começa do final do Alimentador 01, onde está localizada a barra 07, em direção a SE. Como as chaves S2 e S3 encontram-se abertas existem barras onde a distância delas para a barra 07 é maior do que da barra 07 para a SE, assim os efeitos da GD são atenuados nestes pontos.

Assim como o caso de estudo usando banco capacitor, o Alimentador 02 possui níveis de tensão estáveis no decorrer do seu trecho, não precisando da inserção de elementos no seu trecho.

Outro a ponto a se estudar em relação a inserção de GD é o quanto de potência ativa e reativa está sendo demanda pelos alimentadores estudados. Para essa análise fez-se o menu *Export*, da interface do *OpenDSS*, depois dentro desse menu foi escolhida a opção *Powers Element* e assim foi gerado uma arquivo de dados no formato *.csv* contendo as informações das potências ativas e reativas nos elementos do sistema-teste. Como o objetivo é a análise na saída da SE, o estudo foi realizado no elemento *Vsource.source*. Através de manipulação de dados e de gráficos no *MS Excel*, foi possível obter as informações da Figura 85.

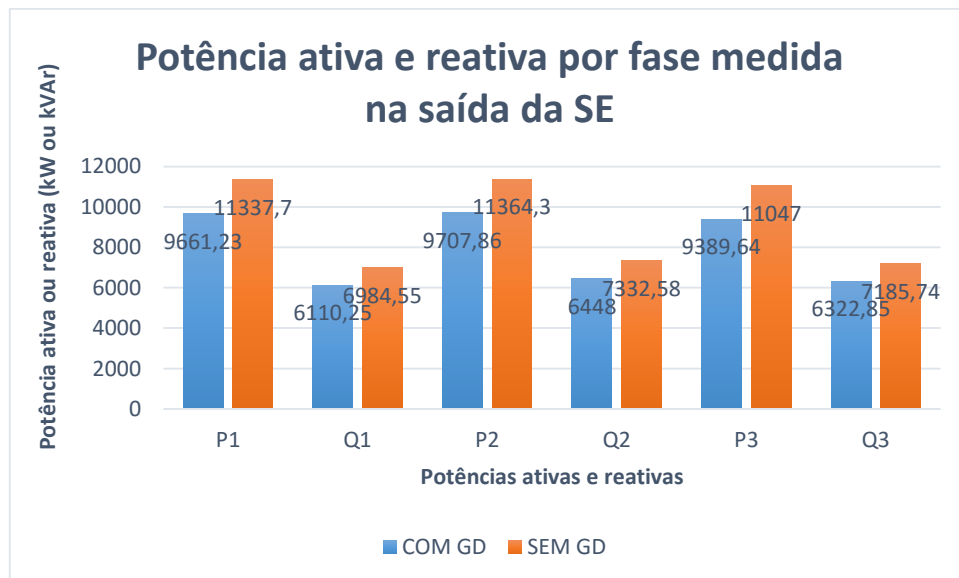


Figura 85: Potência ativa e reativa na saída da SE para os casos com GD e sem GD

Analisando o gráfico da Figura 85 pode-se verificar uma das principais funções da inserção de GD em redes de distribuição de energia elétrica que é o alívio de demanda dos alimentadores, podendo-se constatar uma redução de quase 5000 kW de potência ativa na saída da SE e 2600 kVAr de potência reativa. Em estudos com cargas variantes no tempo, o uso de GD é primordial pois em horários de pico de carga as GDs podem entrar em operação oferecendo o alívio de demanda apresentado. Como este trabalho tem a função de apresentar uma abordagem sobre o software *OpenDSS* e suas principais funcionalidades e aplicações, foge do escopo realizar um análise variante no tempo aplicando um controle de regulação.

c) Comportamento da tensão com previsão de aumento de carga em 45%

O estudo de previsão de carga é muito importante dentro das distribuidoras de energia elétrica, é através dele que será possível organizar investimentos, pesquisar soluções, melhorias nas estruturas, construção de novos alimentadores, novas subestações, entre outras soluções.

Para a realização do estudo de comportamento da tensão com previsão de aumento de carga foi realizado no *MATLAB* pelo fato do software oferecer a opção de realizar laços, o que não é possível no *script* do *OpenDSS*.

A seguir está apresentado o código usado para realizar o aumento de carga no sistema-teste em 45%.

```
iLoads = DSSCircuit.Loads.First; % Cria um vetor iLoads para armazenar as
cargas do sistema-teste
while iLoads, % Criando um laço
    DSSCircuit.Loads.kW = DSSCircuit.Loads.kW*1.45; % Altera os valores
de potência ativa demandada multiplicando por 1.45
    iLoads=DSSCircuit.Loads.Next; % Atualiza o vetor iLoads com os
valores calculados
end % Encerra o laço
```

Figura 86: Castrando o laço para aumentar os valores das cargas em 45%

A seguir está apresentado os gráficos para o Alimentador 01, Figura 88, e para o Alimentador 02, Figura 90, após o aumento de carga.

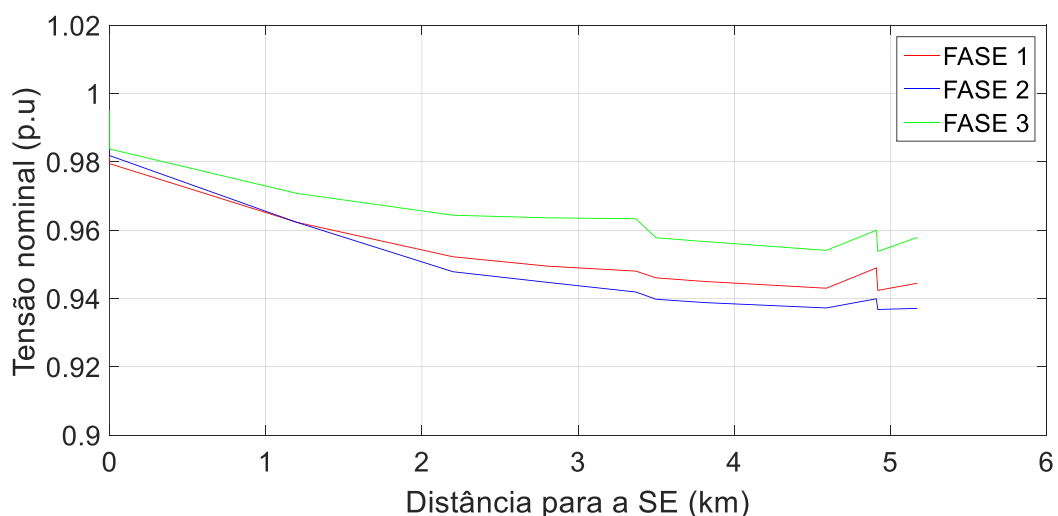


Figura 87: Nível de tensão no Alimentador 01 – Operação Normal

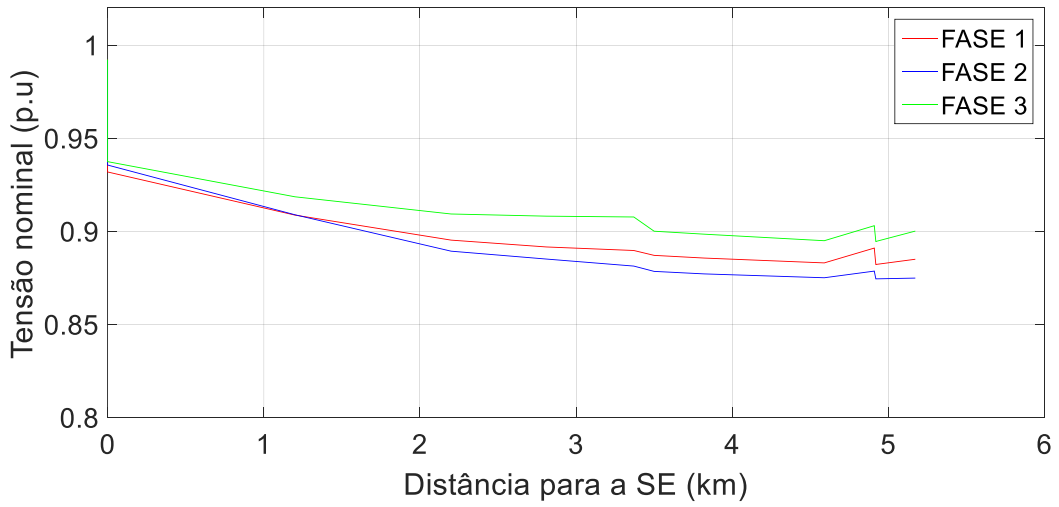


Figura 88: Nível de tensão no Alimentador 01 – Após o aumento de 45% da carga

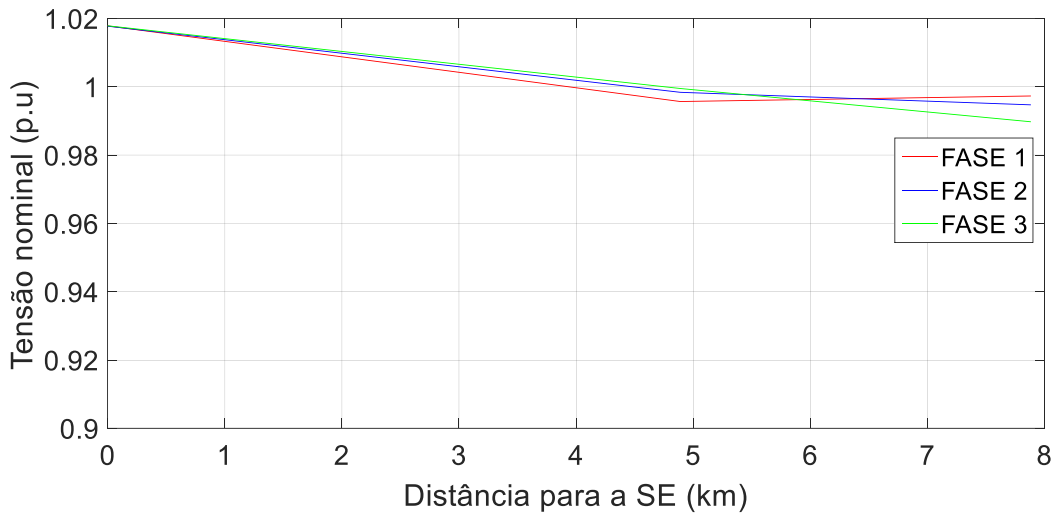


Figura 89: Nível de tensão no Alimentador 02 – Operação Normal

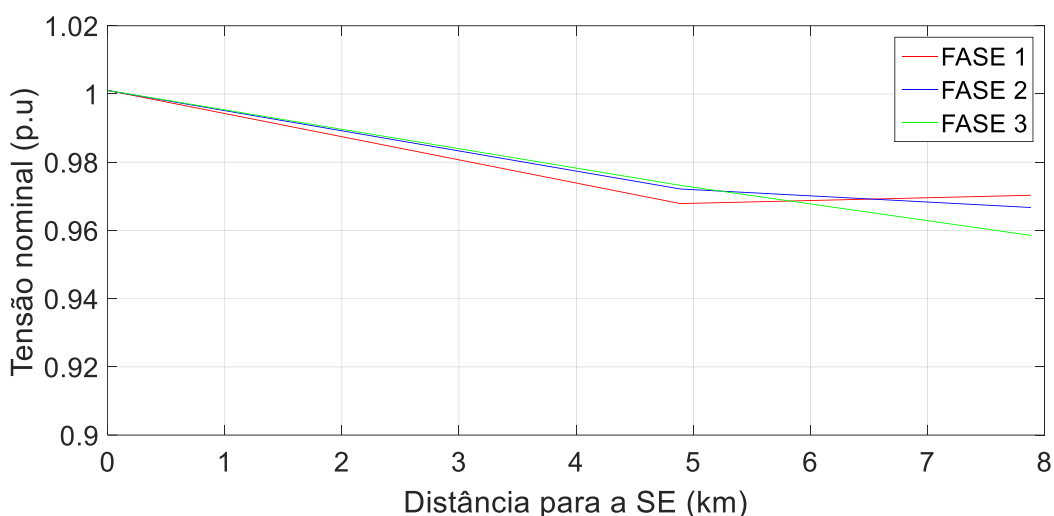


Figura 90: Nível de tensão no Alimentador 02 – Após o aumento de 45% da carga

Na Figura 88 é possível verificar no Alimentador 1 que há uma queda muito alta dos níveis de tensão, em alguns casos acima de 0,1 pu, neste caso o sistema com a configuração e equipamentos que possui, não está preparado para receber um aumento de carga na magnitude da simulação, sendo necessário a concessionária estudar quais medidas serão tomadas para o futuro com a intenção de manter o sistema estável para caso a carga tenha um aumento de 45% da carga no sistema.

O Alimentador 02 após o aumento de carga, Figura 90, apresenta também uma queda dos níveis de tensão, embora não tão baixos quanto os do Alimentador 01 mostrando-se mais preparado para caso haja no futuro um aumento de carga.

Comparando os dois alimentadores em estudo fica claro que as intervenções sejam elas a nível de expansão, manutenção ou automação; são mais urgentes no Alimentador 01 de acordo com todos os dados já apresentados.

6.4. CASOS DE ESTUDO - CURTO-CIRCUITO

Os estudos de curto-circuito foram realizados no sistema-teste apresentado na seção 6.1 com dois alimentadores operando na configuração radial. Para as finalidades dos casos de estudo, foi primeiramente utilizado o modo *FaultStudy* onde é realizado um estudo completo de faltas e depois o modo onde é criado um objeto de falta em um ou mais nós de uma ou mais barras. A seguir estão descritos os casos de estudo.

6.4.1. Definição dos casos de estudo

a) Modo *FaultStudy*

O modo *FaultStudy* irá realizar um estudo completo de faltas no sistema-teste, apresentado um relatório em arquivo *.txt* que irá conter dados para: correntes de falta trifásica em todos os nós do circuito e o fator X/R , para as correntes e tensões no nós em caso de um falta do tipo fase-terra e por fim para as correntes e tensões no nós em caso de um falta do tipo fase-fase (adjacente).

Para a realização do teste o usuário irá selecionar todo o conteúdo do *script* no *OpenDSS* e executar o comando *Do Selected* ou simplesmente *Ctrl+D* se o status, assim será feita a realização do fluxo de potência através do comando *set mode=SnapShot*, já apresentado anteriormente. Caso o relatório de resultados apresente algum erro e o circuito não seja solucionado, o usuário terá de encontrar o que pode estar causando esse erro para solucioná-lo, se não, com o circuito resolvido já será possível realizar o estudo de faltas através do seguintes comandos:

```
! MODO FAULTSTUDY
set mode=FaultStudy

solve

show fault
```

Figura 91: Comando utilizados para solução do circuito no modo *FaultStudy*

A seguir, o usuário selecionará todas as linhas do *script* e executará novamente o comando *Do Selected* ou simplesmente *Ctrl+D*. Feito isso será gerado um relatório em arquivo *.txt* através do uso do comando *show fault*. Para o sistema-teste estudado o relatório completo do estudo de faltas está apresentado a seguir:

Tabela 11: Correntes de falta trifásicas e fator X/R

Falta trifásica em todos os nós						
Barra	Corrente de falta no Nó 1	X/R	Corrente de falta no Nó 2	X/R	Corrente de falta no Nó 3	X/R
0	25099	9.4	25098	9.4	25098	9.4
1	8459	6.6	8460	6.8	8467	7.1
2	5027	3.2	5208	3.4	5125	4.1
3	3725	2.7	3925	2.8	3837	3.4
4	3206	2.5	3398	2.7	3316	3.3
5	2840	2.4	3024	2.6	2948	3.2
8	2772	2.4	2952	2.5	2880	3.1
9	2606	2.4	2780	2.5	2712	3.1
10	2278	2.3	2437	2.4	2377	3.0
6	2157	2.3	2314	2.4	2256	3.0
11	2160	2.3	2315	2.4	2256	3.0
7	2075	2.3	2228	2.4	2169	3.0
12	7288	17.9	7287	17.9	7288	18.0
13	2180	2.6	2327	2.8	2252	3.5
14	1505	2.3	1625	2.6	1572	3.1

A Tabela 11 apresenta os valores de correntes de falta trifásica em cada uma das barras do sistema-teste, podendo verificar que ela é mais alta nas barras que se localizam logo na saída da subestação e vai diminuindo no decorrer do trecho dos alimentadores. É apresentado também o fator X/R que indica a relação entre a falta simétrica e assimétrica, mostrando que a diferença entre essas faltas é maior o quanto mais perto da SE. Este tipo de estudo é essencial no dimensionamento de equipamentos de proteção para sistemas de distribuição de energia elétrica, pois apresenta as informações que uma concessionária precisa para alocação correta dos seus equipamentos.

Tabela 12: Correntes e tensões para falta fase-terra

Faltas fase-terra					
Barra	Nó	Corrente	Tensões nos nós em p.u		
			Nó 1	Nó 2	Nó 3
0	1	10503	0.000	1.343	1.424
0	2	10500	1.424	0.000	1.343
0	3	10501	1.343	1.424	0.000
1	1	8562	0.000	0.979	0.975

1	2	8561	0.971	0.000	0.981
1	3	8567	0.976	0.973	0.000
2	1	4172	0.000	1.052	1.078
2	2	4188	1.081	0.000	1.059
2	3	4210	1.029	1.082	0.000
3	1	2912	0.000	1.071	1.098
3	2	2929	1.102	0.000	1.086
3	3	2957	1.046	1.098	0.000
4	1	2445	0.000	1.085	1.106
4	2	2457	1.110	0.000	1.102
4	3	2484	1.056	1.105	0.000
5	1	2128	0.000	1.094	1.112
5	2	2138	1.115	0.000	1.113
5	3	2165	1.065	1.110	0.000
8	1	2079	0.000	1.090	1.107
8	2	2085	1.114	0.000	1.106
8	3	2115	1.060	1.109	0.000
9	1	1940	0.000	1.095	1.108
9	2	1945	1.116	0.000	1.109
9	3	1974	1.063	1.111	0.000
10	1	1671	0.000	1.103	1.111
10	2	1672	1.119	0.000	1.117
10	3	1700	1.070	1.115	0.000
6	1	1566	0.000	1.117	1.119
6	2	1564	1.128	0.000	1.132
6	3	1593	1.085	1.120	0.000
11	1	1576	0.000	1.107	1.112
11	2	1576	1.120	0.000	1.121
11	3	1603	1.072	1.116	0.000
7	1	1503	0.000	1.114	1.118
7	2	1504	1.125	0.000	1.130
7	3	1530	1.080	1.118	0.000
12	1	7366	0.000	1.014	1.011
12	2	7366	1.011	0.000	1.014
12	3	7367	1.014	1.011	0.000
13	1	1606	0.000	1.168	1.166
13	2	1608	1.183	0.000	1.170
13	3	1612	1.123	1.187	0.000
14	1	1075	0.000	1.191	1.167
14	2	1071	1.195	0.000	1.185
14	3	1080	1.144	1.197	0.000

A Tabela 12 apresenta as correntes e tensões em p.u para a falta do tipo fase-terra aplicados em todas as barras do sistema-teste. Pode-se verificar que quando a falta é aplicada em algum nó a tensão no nó em questão é zero e verifica-se que há uma sobretensão nos outros nós.

Tabela 13: Correntes e tensões para faltas do tipo fase-fase adjacente

Faltas fase-fase						
Barra	Fase da falta		Corrente	Tensões em p.u em cada fase		
	Nó 1	Nó 2		Nó 1	Nó 2	Nó 3
0	1	2	21737	0.498	0.498	0.995
0	2	3	21733	0.995	0.498	0.497
1	1	2	7316	0.491	0.490	0.984
1	2	3	7315	0.979	0.492	0.492
2	1	2	4476	0.482	0.482	0.977
2	2	3	4486	0.956	0.483	0.483
3	1	2	3361	0.477	0.477	0.974
3	2	3	3370	0.944	0.476	0.476
4	1	2	2908	0.475	0.475	0.976
4	2	3	2914	0.939	0.475	0.475
5	1	2	2586	0.473	0.473	0.977
5	2	3	2591	0.936	0.474	0.474
8	1	2	2523	0.473	0.473	0.972
8	2	3	2532	0.933	0.473	0.473
9	1	2	2376	0.472	0.472	0.971
9	2	3	2384	0.931	0.473	0.473
10	1	2	2082	0.471	0.471	0.971
10	2	3	2090	0.927	0.472	0.472
6	1	2	1976	0.473	0.473	0.978
6	2	3	1982	0.932	0.475	0.475
11	1	2	1977	0.470	0.470	0.972
11	2	3	1984	0.926	0.472	0.472
7	1	2	1903	0.471	0.471	0.976
7	2	3	1907	0.928	0.473	0.473
12	1	2	6311	0.509	0.509	1.018
12	2	3	6311	1.018	0.509	0.509
13	1	2	1987	0.499	0.499	1.018
13	2	3	1992	0.981	0.499	0.499
14	1	2	1383	0.500	0.500	1.014
14	2	3	1392	0.974	0.498	0.498

A Tabela 13 apresenta as correntes e tensões em p.u para a falta do tipo fase-fase adjacentes aplicados em todas as barras do sistema-teste. Pode-se verificar que quando a falta é aplicada entre nós há uma queda de tensão de aproximadamente 0,5 p.u nas fases.

b) Objeto de Falta

O outro tipo de falta a ser estudado é quando se cria um objeto de falta, que por default é representado por um resistência polifásica de 0,1 m Ω . Este tipo de falta é usado para simular faltas pontuais, que podem ser do tipo trifásica, fase-fase, fase-terra e fase-fase-terra. A vantagem oferecida por esse método é que o usuário pode escolher desde a magnitude do objeto de falta, em qual barra se localiza e qual o tipo de falta; sendo assim trata-se de um caso para um estudo mais específico.

Para efeitos de simulação será criada uma falta do tipo trifásica e fase-terra nas barras 04 e 08 do Alimentador 01 e 13 do Alimentador 02.

Para a falta do tipo trifásica será implementado o código a seguir:

```
!new fault.faltaAL02 phases=3 bus1=13.1.2.3 !Falta trifásica
```

Figura 92: Cadastro de objeto de falta

É criado um objeto de falta através do comando *new fault.faltaAL02*, para especificar o número de fases é usando o comando *phases* e por fim é escolhida a barra e nós do curto-circuito no caso *.1.2.3* indica que a falta está sendo aplicada entre cada nó da barra e o terra.

A Figura 93 ilustra o afundamento de tensão para o caso de uma falta do tipo trifásica nas barras 04 e 08 do Alimentador 01.

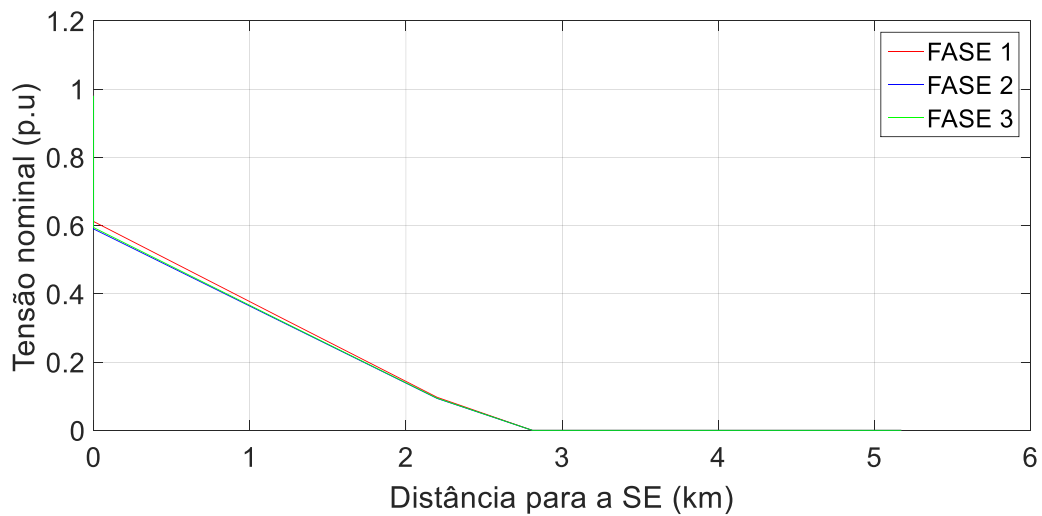


Figura 93: Falta trifásica aplicada nas barras 04 e 08 do Alimentador 01

As faltas trifásicas ocorridas nas barras 04 e 08 ocasionaram mudanças bruscas nas tensões das outras barras. Foi verificado uma queda de tensão na saída da subestação na faixa de 0,4 p.u e no decorrer do alimentador uma queda constante até alcançar os pontos onde estão presentes as barras 04 e 08.

A Figura 94 ilustra o afundamento de tensão para o caso de uma falta do tipo fase-terra na barras 13 do Alimentador 02.

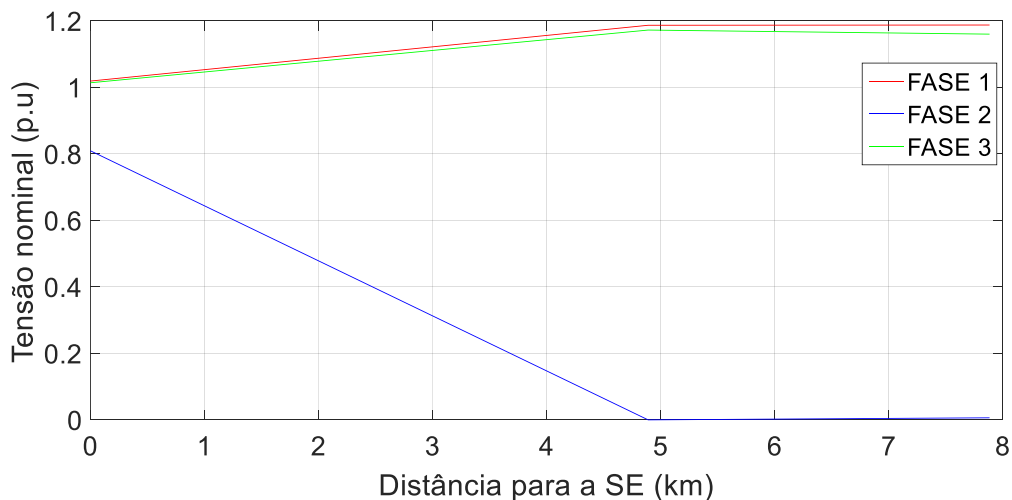


Figura 94: Afundamento de tensão para falta do tipo fase-terra

É possível verificar que no ponto à 4,9 km da subestação, onde está localizada a barra 13, a tensão na fase 2 onde foi aplicada a falta do tipo fase-terra, apresenta valores muito próximos de zero, devido ao fato da corrente de falta para esta fase ser muito alta. Essa falta fez com que houvesse um queda de tensão em todo trecho do

alimentador anterior a barra 13. Para as outras fases foi verificado que houve uma elevação de tensão de até 0,2 p.u.

7. CONCLUSÕES

O comportamento da sociedade em relação ao consumo de energia elétrica está em constante mudança. No passado, as pessoas não faziam ideia de como chegava energia a sua casa, ou muito menos sofre tarifação. Porém hoje em dia, com o desenvolvimento dos meios de comunicação e a preocupação com o meio ambiente é comum discussões sobre consumo adequado de energia, uso de fontes de energia renováveis, tarifação, entre outros. No Brasil, ainda que em fase inicial, vem se espalhando o uso de estações geradoras de energia de pequeno e médio porte, normalmente através de fontes como solar e eólica. A ANEEL trata o uso da geração distribuída como um avanço necessário para o futuro da energia elétrica no Brasil.

O software *OpenDSS* se mostra um ferramenta poderosíssima na análise de sistemas de distribuição de energia elétrica, possuindo um biblioteca de funções muito completa e atualizada para as necessidades futuras sem contar a facilidade de lidar com a linguagem de programação da sua interface. A interface COM é uma ferramenta que permite a implementação de novas análises que não podem ser feitas pelo *OpenDSS* e são feitas em outros softwares como *MATLAB* e *Phyton*, por exemplo.

Para o caso de estudo de inserção de banco de capacitores o *OpenDSS* apresentou-se eficaz mostrando a sua eficiência do uso da interface com o *MATLAB* para inserir os bancos de capacitores e apresentar os resultados, podendo gerar gráficos da maneira que o usuário queira apresentá-los. O estudo de inserção de bancos de capacitores se mostrou eficaz reduzindo a queda do nível de tensão em um dos alimentadores estudados, objetivo principal da inserção de capacitores em alimentadores de sistemas de distribuição de energia elétrica.

O estudo da elevação de carga no sistema-teste foi essencial para mostrar o implementação de laços via interface *MATLAB*, já que o *OpenDSS* não oferece esse recurso. Foi implementado um laço onde aumenta-se o valor da demanda de energia em uma taxa de 45%. Mostrou-se que através desse estudo as concessionárias de energia podem realizar os seus planejamentos e investimentos considerando a inserção de carga no sistema, podendo analisar através do *OpenDSS* quais os pontos do sistema em que ajustes ou inserção de elementos são necessários.

A análise de GD partiu do ponto que há um gerador de energia fixo no fim do alimentador fornecendo potência para o sistema. Através das análises foi possível

observar a melhora no nível de tensão do sistema que este tipo de instalação oferece bem como, o alívio de carga trazido, que é uma das partes essenciais do uso de GD. Como o objetivo do trabalho é trazer uma abordagem geral das principais funcionalidades do software *OpenDSS* em todos os casos anteriores foram utilizados o modo *SnapShot* que analisa o sistema em um ponto fixo, não sendo realizadas análises com variações no tempo.

Por fim, foram realizados estudos de caso para aplicações do *OpenDSS* no estudo de curto-circuito. Para isso foram desenvolvidos análises pontuais usando duas funções. Primeiramente foi usado o modo *FaultStudy* que oferece um relatório completo sobre as faltas que podem ocorrer no sistema, com as suas respectivas correntes e tudo isso em cada nó do sistema-teste, sendo um modo que pode ser usado por concessionárias de energia elétrica para dimensionamento de equipamentos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica. Para finalizar a análise de curto-circuito foi apresentado o modo que permite o usuário criar um objeto de falta, onde ele pode ser dimensionado, alocado e onde pode-se escolher o tipo de falta, com total liberdade para o usuário. Os gráficos gerados mostraram sua eficácia na análise do comportamento da rede no decorrer do alimentador durante a ocorrência de um curto-circuito.

REFERÊNCIAS

CHEN, T. Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach. In: IEEE. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.] v.6, n.3, jul. 1991.

CYME. **Distribution System Analysis**. Disponível em:
<<http://www.cyme.com/software/cymdist/>>. Acesso em: 02 jul. 2017.

DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, T. E. An open source platform for collaborating on smart grid research. In: IEEE. **Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE**. [S.l.], 2011.

DUGAN, R. C. **Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (Open DSS)**. [S.l.]: Electric Power Research Institute, 2013.

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

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. ed. 2. Las Cruces: CRC PRESS, 2007.

MILSOFT UTILITY SOLUTIONS. **Milsoft Engineering Analysis(EA)-WindMil**. Disponível em: <<https://www.milsoft.com/utility-solutions/upgrades/milsoft-engineering-analysis-ea-windmil%C2%AE>>. Acesso em: 02 jul. 2017.

SEXAUER, J. **New User Primer: The Open Distribution System Simulator (Open DSS)**. [S.l.]: Electric Power Research Institute, 2012.

SOURCEFORGE. **OpenDSS**. Disponível em:
<<https://sourceforge.net/projects/electricdss/>>. Acesso em: 02 jul. 2017.

STAGG, G. W.; EL-ABIAD, A. H. **Computer Methods in Power System Analysis**. [S.l.]: McGraw Hill, 1968.

TASK FORCE C6.04. **Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources.** [S.l.]: Cigré, 2014.

U.S DEPARTMENT OF ENERGY, OFFICE OF ELECTRICITY DELIVERY AND ENERGY RELIABILITY. **A Unique Tool to Design the Smart Grid.** Disponível em: < <http://www.gridlabd.org/>>. Acesso em: 02 jul. 2017.

ANEXO A – RESULTADOS ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA O SISTEMA-TESTE CIGRÉ

Tabela 14: Resultados de fluxo de potência para o sistema-teste (CIGRÉ, 2012)

Bus	Voltage			From bus to bus	Current		
	Phase	LL rms	angle		Phase	rms	angle
		[kV]	[degree]			[A]	[degree]
0	AB	115	0	HV bus - 0	A	206.22	-34.14
0	BC	115	-120	HV bus - 0	B	208.75	-155.25
0	CA	115	120	HV bus - 0	C	204.00	84.69
1	AB	12.49	19.36	0-1	A	1360.01	-5.72
1	BC	12.52	-100.28	0-1	B	1317.23	-125.58
1	CA	12.57	139.41	0-1	C	1275.83	114.08
2	AB	12.19	18.04	1-2	A	238.80	-6.89
2	BC	12.20	-101.48	1-2	B	275.76	-128.47
2	CA	12.29	138.25	1-2	C	246.26	112.27
3	AB	12.02	17.13	2-3	A	162.94	-7.38
3	BC	11.99	-102.26	2-3	B	228.49	-127.80
3	CA	12.11	137.56	2-3	C	178.37	112.25
4	AB	11.98	16.90	3-4	A	66.61	-5.38
4	BC	11.95	-102.42	3-4	B	86.91	-127.42
4	CA	12.09	137.38	3-4	C	54.99	114.70
5	AB	11.96	16.73	4-5	A	39.91	-3.24
5	BC	11.91	-102.54	4-5	B	73.66	-127.15
5	CA	12.06	137.26	4-5	C	41.54	115.59
6	AB	11.95	16.65	5-6	A	6.68	-1.06
6	BC	11.89	-102.76	5-6	B	13.18	-121.55
6	CA	12.02	137.18	5-6	C	34.94	117.40
7	AB	11.89	16.37	8-7	A	13.29	-1.32
7	BC	11.83	-103.00	8-7	B	26.24	-121.89
7	CA	11.97	136.95	8-7	C	13.34	118.97
8	AB	11.94	16.56	3-8	A	85.89	-7.45
8	BC	11.86	-102.86	3-8	B	104.57	-126.71
8	CA	11.99	137.06	3-8	C	106.11	82.11
9	AB	11.89	16.47	8-9	A	59.39	-8.53
9	BC	11.84	-102.95	8-9	B	58.71	-128.02
9	CA	11.97	136.98	8-9	C	66.19	110.97
10	AB	11.86	16.35	9-10	A	46.23	-10.61
10	BC	11.81	-103.11	9-10	B	39.18	-131.21
10	CA	11.93	136.83	9-10	C	53.04	108.94
11	AB	11.85	16.31	10-11	A	26.36	-11.73
11	BC	11.80	-103.14	10-11	B	26.08	-132.08
11	CA	11.93	136.80	10-11	C	19.91	105.21
12	AB	12.55	25.83	0-12	A	401.77	-1.84
12	BC	12.55	-94.16	0-12	B	401.74	-121.84
12	CA	12.55	145.84	0-12	C	401.23	118.09
13	AB	12.18	24.29	12-13	A	77.72	-1.18
13	BC	12.18	-95.69	12-13	B	77.70	-121.15
13	CA	12.18	144.31	12-13	C	77.19	118.40
14	AB	12.14	24.14	13-14	A	12.20	-1.73
14	BC	12.12	-96.21	13-14	B	12.16	-121.55
14	CA	12.07	144.04	13-14	C	46.96	122.13