



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

MODELAGEM E ANÁLISE ESTÁTICA DE UM ALIMENTADOR REAL DA CPFL PAULISTA

Autor:

Gustavo Ramos de Paula

Número USP:

7239405

Orientador:

Prof. Dr. João Bosco Augusto London Jr.

São Carlos

2016

GUSTAVO RAMOS DE PAULA

**MODELAGEM E ANÁLISE ESTÁTICA DE UM
ALIMENTADOR REAL DA CPFL PAULISTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola
de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São
Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas
de Energia e Automação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Bosco Augusto
London Jr.

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

R175m Ramos de Paula, Gustavo
Modelagem e Análise Estática de um Alimentador Real
da CPFL Paulista / Gustavo Ramos de Paula; orientador
João Bosco Augusto London Jr.. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2016.

1. Sistemas de Distribuição. 2. Parâmetros de
Linhas. 3. Fluxo de Potência. 4. OpenDSS. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Gustavo Ramos de Paula

Título: "Modelagem e análise estática de um alimentador real da CPFL Paulista"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25 / 11 / 2016,

com NOTA 9,5 (nove, cinco), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado João Bosco Augusto London Júnior - Orientador - SEL/EESC/USP

Mestre Leandro Tolomeu Marques - Doutorando - SEL/EESC/USP

Mestre Júlio Augusto Druzina Massignan - Doutorando - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

Resumo

O presente trabalho apresenta a modelagem de um alimentador de distribuição de energia elétrica real da concessionária CPFL Paulista, partindo de um levantamento de um banco de dados para tal propósito e posterior análise em regime estático por meio do fluxo de potência deste alimentador, a fim de validar o modelo obtido. Vale ressaltar que as linhas de distribuição são os componentes mais numerosos que constituem os sistemas de distribuição, apresentando características físicas e geométricas distintas em cada trecho, o que se traduz em parâmetros elétricos diferentes para cada uma delas, de modo que se exprima a real condição operacional destas redes, considerando suas particularidades. Deste modo, as linhas são bem representadas pelos parâmetros calculados através do método das imagens de Carson, denominados constantes quilométricas, que são utilizados na modelagem trifásica das linhas de distribuição do circuito, uma vez que modelos monofásicos se mostraram insuficientes na caracterização das mesmas. O fluxo de potência, resolvido neste trabalho com auxílio do *software* OpenDSS, é uma das ferramentas comumente utilizadas para estudos em fases de projeto, planejamento de expansão, planejamento da operação e operação dos sistemas elétricos. Ademais, estes estudos de rede são utilizados para garantir que o projeto e situação operacional não estejam violando restrições da operação de equipamentos e estejam em conformidade com normas e limites de qualidade de energia, estabelecidos pelo órgão regulador (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL) através dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST). A obtenção dos modelos, por sua vez, constitui a base para posteriores análises mais detalhadas a respeito dos sistemas de distribuição como, por exemplo: estudos de reconfiguração de rede, proteção, análise de harmônicos, estimação de estado, e outros.

Palavras-chave: Sistemas de Distribuição, Parâmetros de Linha, Fluxo de Potência, OpenDSS.

Abstract

This work presents the modeling of a real electric power distribution feeder of CPFL Paulista company, first by obtaining a database that serves this purpose and then perform a static analysis of this feeder aiming on consolidating the model acquired. It must be highlighted that the distribution lines are the most numerous components of a distribution system and they present distinct physical and geometrical characteristics for each stretch, which results in different electric parameters in a way that it can express the real operational condition of the network, considering its particularities. Thus, the lines are well represented by the parameters, also known as kilometric constants, calculated through Carson's method using the conductors images, employed on the three phase modeling of the distribution circuit, once single phase models are not sufficient for its full representation. The power flow problem, solved in this work by the OpenDSS software, is a commonly used tool for distribution system studies on design phases, planning and expansion, operation planning and operation of electric systems. Furthermore, these network studies are used to ensure that the network's project and operational state do not in violate the equipment limitations and are in conformity with the energy quality standards established by the regulator agency (ANEEL) through its Distribution Procedures (PRODIST). The system modeling, in its turn, constitutes the basis for further detailed analysis on distribution systems, such as: network reconfiguration, protection, harmonic analysis, state estimation and others.

Keywords: Distribution Systems, Line Parameters, Power Flow, OpenDSS.

Agradecimentos

Aos meus pais, Ronaldo Luiz e Maria Eunice, por todo apoio, carinho e suporte durante todos esses anos, em especial durante a elaboração deste trabalho.

À minha irmã, Glaucia, por estar presente, e pelos conselhos e energia positiva que me foram passados durante todos os momentos difíceis.

Ao Professor Doutor João Bosco Augusto London Jr, pela orientação, atenção e incentivo no decorrer da elaboração deste trabalho.

Aos companheiros de laboratório (LACO), em especial ao Júlio Massignan, pela amizade, paciência e colaboração essencial na elaboração deste trabalho.

À todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que dedicados ao conhecimento e apoio aos graduandos me agregaram muito como profissional e como pessoa.

Aos amigos de apartamento, Tiago, Marcelo, Danilo e Guto pelas experiências de vida e longas noites de estudo compartilhadas que estarão sempre em nossas memórias.

À CPFL que representada pelo Engenheiro Alexandre Vieira de Oliveira concedeu o conjunto de dados que possibilitou a realização deste trabalho.

E finalmente à todos os amigos da USP, que de alguma maneira contribuíram para a minha formação durante todos os anos de graduação.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. CONTEXTO	19
1.2. OBJETIVOS	20
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2. REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	22
2.1. OS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	22
2.2. OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	24
2.2.1. Rede de Distribuição Primária.....	24
2.2.2. Os equipamentos dos Sistemas de Distribuição.....	26
2.3. TIPOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	27
2.3.1. Rede de distribuição aérea convencional.....	27
2.3.2. Rede de Distribuição Aérea Compacta	28
2.3.3. Rede de Distribuição Aérea Isolada.....	29
2.3.4. Rede de distribuição subterrânea	30
3. PARÂMETROS TRIFÁSICOS DE LINHAS DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	32
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	32
3.2. CONSTANTES QUILOMÉTRICAS DE CABOS NUS.....	33
3.2.1. Impedância série de linhas aéreas	33
3.2.2. Cálculo da admitância em derivação – Capacitância Shunt	37
3.3. CONSTANTES QUILOMÉTRICAS DE CABOS ISOLADOS	39
3.3.1. Considerações gerais.....	39
3.3.2. Elementos série - Impedâncias.....	39
3.3.3. Cálculo da admitância em derivação – Capacitância Shunt	41
4. MEMORIAL DE CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS TRIFÁSICOS DO	
ALIMENTADOR DA CPFL	42
4.1. APRESENTAÇÃO DOS DOCUMENTOS DA CPFL	42
4.2. LEVANTAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	44
4.3. REDE PRIMÁRIA AÉREA COMPACTA COM CONDUTORES NUS.....	45
4.3.1. Da Especificação dos Cabos.....	45
4.3.2. Da Disposição das Fases Na Cruzeta.....	47
4.3.3. Parâmetros para Cálculos de Constantes Quilométricas das Linhas.....	48
4.3.4. Cálculo das Constantes Quilométricas das Linhas	49

4.4.	REDE PRIMÁRIA AÉREA COMPACTA COM CONDUTORES COBERTOS.....	53
4.4.1.	<i>Da Especificação Dos Cabos.....</i>	53
4.4.2.	<i>Do Espaçamento das Fases.....</i>	55
4.4.3.	<i>Cálculo das constantes quilométricas das linhas aéreas compactas.....</i>	55
5.	O SOFTWARE OPENDSS.....	57
5.1.	BREVE HISTÓRIA DO SOFTWARE OPENDSS.....	57
5.2.	MODELOS BÁSICOS.....	58
5.2.1.	<i>Barras.....</i>	58
5.2.2.	<i>Terminal.....</i>	58
5.2.3.	<i>Elementos de Transporte de Energia.....</i>	59
5.2.4.	<i>Elementos de Conversão de Energia.....</i>	59
5.3.	ELEMENTOS BÁSICOS.....	60
5.3.1.	<i>Equivalente de Thévenin.....</i>	60
5.3.2.	<i>Linha.....</i>	61
5.3.3.	<i>Carga.....</i>	63
5.3.4.	<i>Curva de Carga.....</i>	64
5.4.	MODOS DE SIMULAÇÃO.....	65
5.4.1.	<i>O Fluxo de Potência.....</i>	66
5.4.2.	<i>Linhas de comando no OpenDSS.....</i>	67
6.	MODELOS DE ALIMENTADORES NO OPENDSS	68
6.1.	REDE TESTE IEEE 13 BARRAS	68
6.2.	ANÁLISE ESTÁTICA DO ALIMENTADOR DA CPFL	74
6.2.1.	<i>Modelagem OpenDSS.....</i>	74
6.2.2.	<i>Análise em horário de pico.....</i>	76
6.2.3.	<i>Análise ao longo de um dia.....</i>	78
7.	CONCLUSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS.....	84
	APÊNDICE A.....	86
	APÊNDICE B.....	92

Lista de Ilustrações

Figura 01 - Diagrama unifilar de um típico sistema elétrico de potência. (Fonte: Kagan <i>et al.</i> , 2005)	23
Figura 02 - Diagrama simplificado de uma subestação de distribuição. (Fonte: Kersting, 2002)	24
Figura 03 - Diagrama unifilar de rede primária com configuração radial com socorro. (Fonte: Kagan <i>et al.</i> , 2005)	26
Figura 04 - Diagrama unifilar de um alimentador simples. (Fonte: Kersting, 2002)	27
Figura 05 - Configuração espacial dos condutores de linhas aéreas convencionais da rede primária e secundária. (Fonte: Elektro, 2014)	28
Figura 06 - Elementos da rede compacta: cabo mensageiro, cabos de fase, espaçador polimérico e o braço suporte tipo “L”. (Fonte: CPFL, 2016)	29
Figura 07 - Cabo de Alumínio Isolado Multiplexado 20/35 kV autossustentado por mensageiro de aço galvanizado. (Fonte: Montemezzo, 2016)	29
Figura 08 - Configuração dos condutores de linhas aéreas compactas isoladas. (Fonte: Montemezzo, 2016)	30
Figura 09 - Bancos de dutos e câmara para instalação de equipamentos em área de alta densidade de carga. (Fonte: COPEL, 2010)	30
Figura 10 - Método das imagens e o sistema de coordenadas para os centros dos condutores. (Fonte: Kagan <i>et al.</i> , 2005)	32
Figura 11 - Mapa com destaque no alimentador da CPFL	42
Figura 12 - Detalhe disposição dos dados no documento da CPFL	43
Figura 13 - Detalhe das distâncias e postes no documento da CPFL	43
Figura 14 - Estrutura tipo B identificada pelo <i>Google Street View</i>	44
Figura 15 - Aspectos da formação dos cabos CAA (Fonte: CPFL, 2007)	45
Figura 16 - Tabela de Especificações para os cabos de alumínio com alma de aço. (Fonte: CPFL, 2007)	46
Figura 17 - Tabela dos códigos dos condutores e bitola correspondente. (Fonte: CPFL, 2015)	46
Figura 18 - Estrutura rede primária nua tipo B. (Fonte: CPFL, 2016)	47
Figura 19 - Estrutura rede primária nua tipo M. (Fonte: CPFL, 2016)	47
Figura 20 - Estrutura rede primária nua tipo N. (Fonte: CPFL, 2016)	48
Figura 21 - Parâmetros dos cabos utilizados nos cálculos elétricos da CPFL. (Fonte: CPFL, 2015)	48
Figura 22 - Desenho do condutor com cobertura XLPE. (Fonte: CPFL, 2012b)	53
Figura 23 - Especificações dos cabos cobertos padronizadas pela CPFL. (Fonte: CPFL, 2012b)	54
Figura 24 - Dados do cabo coberto da classe de 15kV fornecidos pelo fabricante. (Prysmian, 2016)	54
Figura 25 - Padrão técnico do espaçador losangular de redes primárias compactas. (Fonte: CPFL, 2012a)	55

Figura 26 - Elemento barra no <i>software</i> OpenDSS.	58
Figura 27 - Elemento terminal com N conectores. (Dugan, 2016).....	58
Figura 28 - Elemento de transporte de energia com dois terminais, o primeiro com N terminais e o segundo com M terminais. (Fonte: Dugan, 2016)	59
Figura 29 - Elemento de conversão de energia. (Fonte: Dugan, 2016)	59
Figura 30 - Diagrama unifilar da rede teste IEEE 13 barras (IEEE, 2010).	68
Figura 31 - Perfil de tensões ao longo da rede teste do IEEE 13 Barras.	71
Figura 32 - Grafo da topologia do alimentador da de 132 barras da CPFL.	74
Figura 33 - Curvas de carga agregadas para potência ativa e reativa ao longo de um dia (96 pontos) – Fase a	75
Figura 34 - Curvas de carga agregadas para potência ativa e reativa (96 pontos) – Fase b	75
Figura 35 - Curvas de carga agregadas para potência ativa e reativa (96 pontos) – Fase c	75
Figura 36 - Perfil de tensões ao longo do alimentador da CPFL.....	76
Figura 37 - Fluxo de potência ativa e reativa obtido através do elemento <i>monitor</i> inserido na saída do alimentador.	79
Figura 38 - Magnitudes de tensão por fase com <i>monitor</i> inserido na barra 133	79

Lista de Tabelas

Tabela 01 - Configurações das linhas aéreas nuas.	45
Tabela 02 - Principais parâmetros do elemento <i>Circuit</i>	60
Tabela 03 - Principais parâmetros do elemento <i>LineCode</i>	61
Tabela 04 - Principais parâmetros do elemento <i>Line</i>	62
Tabela 05 - Modelos de carga do OpenDSS.....	63
Tabela 06 - Principais parâmetros do elemento <i>Load</i>	64
Tabela 07 - Principais parâmetros do elemento <i>Loadshape</i>	65
Tabela 08 - Capacitores da rede teste do IEEE 13 barras.....	69
Tabela 09 - Transformador da rede teste IEEE 13 barras.....	69
Tabela 10 - Regulador da rede teste IEEE 13 barras.....	70
Tabela 11 - Carga distribuída da rede teste IEEE 13 barras.....	71
Tabela 12 - Tensão e ângulos nodais para cada barra da rede teste IEEE 13 barras.....	72
Tabela 13 - Tensões máximas e mínimas por fase da rede teste do IEEE.	72
Tabela 14 - Tensões de sequencia em p.u. e fator de desbalanço de tensão.....	73
Tabela 15 - Posições de <i>tap</i> calculadas pelo OpenDSS.....	73
Tabela 16 - Demanda de potência ativa e reativa total para a rede teste do IEEE.	74
Tabela 17 - Tensões operacionais máxima e mínima por fase.	77
Tabela 18 - Demanda de potência ativa e reativa total do alimentador da CPFL Paulista.....	77
Tabela 19 - Violação do carregamento de rede durante o instante de máxima demanda.....	78

1. Introdução

1.1. Contexto

A energia elétrica tem desempenhado papel importante na história das sociedades desde sua descoberta até os dias de hoje. Esta forma de energia secundária, que provém da transformação de outros tipos de energia, proporciona conforto, comodidades e progresso econômico. Deste modo, ao longo dos anos, a complexidade dos sistemas elétricos de potência tem aumentado, no sentido de que as sociedades modernas, dependentes de muitas das facilidades providas pela energia elétrica, exigem um fornecimento de energia elétrica que seja confiável, de qualidade e pouco susceptível a falhas.

A função de transformar e fornecer energia elétrica para consumidores de grande ou pequeno porte cabe aos sistemas elétricos de potência, o que engloba os processos de geração, transmissão e distribuição desta energia. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável por regulamentar a qualidade e confiabilidade da energia que é entregue ao consumidor final.

O Brasil, por apresentar grande potencial de geração hidrelétrica, possui distâncias muito grandes entre as zonas de geração e os centros consumidores, de tal modo que uma malha extensa e interligada do sistema de transmissão é de grande importância para conduzir a energia elétrica gerada até onde existe sua demanda. Nos centros consumidores, a energia que chega pelas linhas de transmissão, deve ser distribuída aos diversos tipos de clientes, indústrias de grande porte, pequenas residências, etc.. As tensões devem ser adequadas para estes clientes de modo que um outro sistema se torna responsável por essa adequação: o sistema de distribuição. Este por sua vez é composto por redes elétricas primárias, que operam em média tensão, e redes elétricas secundárias, que operam em baixa tensão. As companhias concessionárias distribuidoras de eletricidade, supervisionadas pela ANEEL, detêm a responsabilidade de operação e manutenção destes sistemas.

Para garantir que o projeto e situação operacional das redes de distribuição não estejam violando restrições da operação de equipamentos e estejam em conformidade com normas e limites de qualidade de energia, estabelecidos pelo órgão regulador (ANEEL) através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), as empresas distribuidoras de energia elétrica realizam diversas simulações computacionais para análises de rede. Dentre estas simulações, se destaca o fluxo de carga como uma das ferramentas mais comuns para estudos de rede de distribuição, podendo ser utilizado nas fases de projeto, planejamento de expansão, planejamento da operação e operação dos sistemas elétricos, podendo também ser utilizado de forma integrada com estudos de confiabilidade, otimização, controle e supervisão. Essas simulações fornecem aos engenheiros responsáveis pelos sistemas de distribuição informações importantes, como tensões nas barras da rede, perdas técnicas,

queda de tensão e a distribuição dos fluxos de potência ativa e reativa que fluem ao longo do alimentador (ANEEL, 2016b; Montemezzo, 2016).

Esses estudos e análises, necessitam de um modelo consolidado do sistema. Alguns modelos que assumem um balanceamento das cargas, de modo que pode ser caracterizado por uma única fase (modelo de sequência positiva), já foram aplicados em sistemas de distribuição. No entanto, para que sejam obtidos resultados que expressem a real condição destas redes, é necessário que as mesmas tenham sido modeladas adequadamente, considerando suas particularidades de modo que se consiga representar fenômenos típicos destes sistemas. Foi notado que modelos monofásicos não são suficientes para a total caracterização dos sistemas de distribuição, o que se deve a: presença de cargas distribuídas desbalanceadas, trechos de linhas monofásicos, bifásicos e trifásicos, dentre outros fatores. Isto posto, aponta-se a necessidade da modelagem trifásica de todos os componentes dos sistemas de distribuição de energia elétrica (Kersting, 2010; Montemezzo, 2016).

Vale ressaltar que as linhas são os componentes mais numerosos que constituem os sistemas elétricos de potência, sendo responsáveis por transmitir a energia desde o ponto de geração até o consumidor final. Como citado anteriormente, em se tratando de sistemas de distribuição tais linhas podem ser trifásicas, com ramais bifásicos e/ou monofásicos em um mesmo alimentador. Além disso, as linhas podem ser aéreas (convencionais, compactas ou isoladas) ou subterrâneas, empregando tipos distintos de condutor para cada padrão de instalação (Kersting, 2010; Montemezzo, 2016). Em outras palavras, as linhas de distribuição apresentam características físicas e geométricas distintas para cada configuração, o que se traduz em modelos distintos para cada uma delas. Deste modo, faz-se necessário a realização de estudos dos modelos existentes, permitindo assim a representação do comportamento físico de cada trecho de linha em particular.

Ante o exposto, o presente trabalho se destina ao levantamento dos parâmetros e modelos de linhas para um alimentador real da CPFL Paulista, de modo a representá-lo o mais fielmente possível. Além disso, a utilização de um *software* de análise bem consolidado no mercado será empregado na validação desse modelo, por meio da solução do fluxo de potência para este alimentador.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é levantar um modelo de um alimentador de distribuição real da CPFL Paulista fazendo uso do método das imagens de Carson (1926), que será apresentado ao longo deste texto, para o levantamento das constantes quilométricas de seus trechos de linha. O alimentador em questão apresenta trechos de rede de dois tipos: aérea com condutores nus (denominada rede convencional) e aérea compacta com condutores cobertos. Ambos devem ser modelados considerando a metodologia de cálculo de constantes quilométricas de cabos não isolados.

De posse do modelo do alimentador, bem como dos dados de perfis de carga documentados pela CPFL Paulista, propõe-se realizar a validação do modelo por meio da análise estática do mesmo, em outras palavras, pela realização do cálculo do fluxo de carga (ou fluxo de potência) da rede elétrica

do alimentador. Esses estudos visam essencialmente a determinação do estado da rede em instantes de carregamento específicos, a distribuição dos fluxos e outras grandezas de interesse (MONTICELLI, 1983). Para isso, intenciona-se utilizar o *software* OpenDSS que apresenta diversas funcionalidades de análise de circuitos de distribuição de energia elétrica.

Será realizado um estudo prévio das funcionalidades do OpenDSS. Apresentar-se-á, ao leitor, as principais ferramentas de análise e linhas de comando utilizadas no OpenDSS para caracterização de um modelo trifásico de um alimentador de distribuição. A utilização de sistemas teste do IEEE, de menor complexidade, servirá como facilitador na observação das soluções apresentadas pelo *software*, e posteriores análises das mesmas.

Finalmente destaca-se que a motivação principal para desenvolvimento deste trabalho foi criar um procedimento detalhado para fazer a modelagem de um alimentador de distribuição real da CPFL Paulista, partindo do levantamento de um banco de dados direcionado para este propósito, até chegar à utilização de ferramentas computacionais consolidadas no mercado para análise destes modelos. Tudo isso de modo a facilitar o desenvolvimento de estudos e pesquisas conjuntos entre a universidade e a companhia. Os modelos obtidos constituem a base para posteriores análises mais detalhadas a respeito destes sistemas de distribuição, como, por exemplo: estudos de reconfiguração de redes, proteção, análises de harmônicos, estimação de estado e planejamento da rede.

1.3. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido nos seguintes capítulos:

O capítulo 2 descreve as principais características dos sistemas elétricos de potência, dando enfoque aos sistemas de distribuição quanto às características topológicas, equipamentos que os constituem e os tipos de instalações de redes de distribuição: aéreas nuas (rede convencional), aéreas compactas, aéreas isoladas e subterrâneas.

O capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada na obtenção dos parâmetros elétricos trifásicos de interesse para as linhas de distribuição: matrizes de impedância série e matrizes de capacitância *shunt*.

O capítulo 4 evidencia o procedimento de modelagem do alimentador da CPFL Paulista, apresentando aspectos das normas internas da companhia que foram adotadas no modelo, e ainda o memorial de cálculo descritivo usado na obtenção das constantes quilométricas das configurações dos trechos de linha.

O capítulo 5 introduz o *software* OpenDSS, apresentando os principais modelos de componentes, ferramentas e comandos utilizados na modelagem e simulação de circuitos de distribuição de energia elétrica.

O capítulo 6 exhibe os resultados e análises realizadas com auxílio das simulações no *software*, primeiramente para o sistema teste do IEEE de 13 barras, e posteriormente para o alimentador da CPFL Paulista modelado neste trabalho. As principais conclusões deste trabalho encontram-se no capítulo 7.

2. Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Este capítulo tem o propósito de descrever as principais características dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), evidenciando o sistema de distribuição (SD) que é escopo principal deste trabalho. Além disso, destacando algumas peculiaridades dos Sistemas de Distribuição e apresentando alguns de seus elementos constituintes, objetiva-se mostrar que não são aplicáveis algumas das simplificações presentes nos modelos monofásicos de linhas de sistemas de transmissão.

Deste modo, a seção 2.1 trata de aspectos gerais dos sistemas elétricos de potência, apresentando a topologia e níveis de tensão operacionais padronizados para os blocos que o compõem. Vale ressaltar que os SEP são compostos pelos três principais blocos: geração, transmissão e distribuição. Na seção 2.2, apresenta-se os sistemas de distribuição com maior enfoque, destacando características importantes para a modelagem dos mesmos. A seção 2.3 faz um levantamento dos principais componentes e equipamentos que compreendem os sistemas de distribuição. Por fim, na seção 2.4 são apresentados os tipos de redes de distribuição de energia elétrica presentes nas redes de média e baixa tensão.

2.1. Os Sistemas Elétricos de Potência

Os sistemas elétricos de potência (SEP) desempenham a função de fornecedor de energia elétrica aos consumidores, independente do seu porte, com segurança, qualidade adequada, e no instante que for solicitada. Em outras palavras, este sistema atua desde a produção: transformação da energia de alguma natureza, seja hidráulica, térmica, mecânica ou outra, em energia elétrica; até o transporte e distribuição: entregando aos consumidores a energia demandada, a cada instante. (Kagan *et al.*, 2005)

De forma simplificada, o sistema elétrico de potência é corriqueiramente dividido em três grandes blocos: geração, transmissão e distribuição. Dentro de cada um destes segmentos, existem certas divisões de níveis de tensão que permitem as interfaces entre companhias elétricas que possuem suas concessões. A subtransmissão, que faz a interface entre a tensão entregue pelas empresas elétricas de transmissão e a tensão das concessionárias de distribuição, é um exemplo. Como ilustração, o diagrama unifilar de um típico sistema elétrico de potência é apresentado na Figura 1.

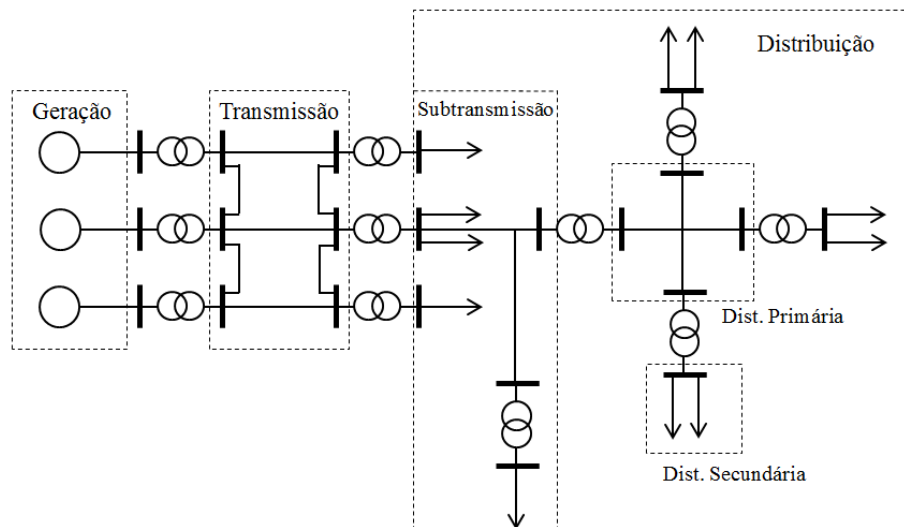


Figura 01 - Diagrama unifilar de um típico sistema elétrico de potência.
(Fonte: Kagan *et al.*, 2005)

O bloco de geração de energia elétrica tem a função de converter alguma forma de energia primária em energia elétrica. Em geral essa conversão depende da movimentação de uma turbina, acionada por fontes primárias (como hidráulica, nuclear, fóssil) e do gerador, máquina elétrica que converte essa energia mecânica em energia elétrica. No Brasil, a geração adota como padrão níveis de tensão da ordem de 10 à 30 kV, com frequência fixa a 60 Hz.

Devido ao fato de as unidades geradoras estarem localizadas à grandes distâncias dos centros de consumo, a energia deve ser “transferida” via linhas de transmissão, que compõem o segundo bloco dos SEP. A fim de tornar factível o transporte de energia a grandes distâncias se faz necessária a elevação da tensão, o que é realizado por transformadores elevadores instalados nas saídas das estações geradoras. Tal procedimento se faz necessário, haja vista com o aumento da tensão a corrente circulante nos condutores diminui, o que, por conseguinte, reduz as perdas de potência ativa nas linhas por efeito Joule. No Brasil, o sistema de transmissão, denominado rede básica, opera no mais alto nível de tensão, em tensões de 230 kV a 750 kV (ANEEL, 2016; Kagan *et al.*, 2005).

Quando mais próximo dos centros de carga, o nível elevado de tensão da rede básica é reduzido à denominada tensão de subtransmissão, de modo a ser compatível ao suprimento de consumidores de grande porte e subestações de distribuição. O papel de nivelamento de tensões é desempenhado pelas subestações (SE), que segundo o PRODIST, são definidas como o “Conjunto de instalações elétricas em média ou alta tensão que agrupa os equipamentos, condutores e acessórios, destinados à proteção, medição, manobra e transformação de grandezas elétricas” (ANEEL, 2016). Deste modo, as SEs são pontos de convergência, ou ainda, entrada e saída de linhas de transmissão e distribuição, constituindo uma interface entre esses dois macro segmentos. A Figura 2 apresenta um diagrama unifilar de uma subestação de distribuição.

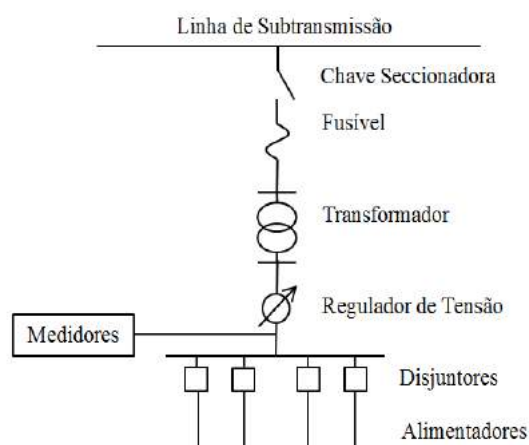


Figura 02 - Diagrama simplificado de uma subestação de distribuição. (Fonte: Kersting, 2002)

As redes de distribuição primária, que são escopo deste trabalho, tem origem nas SEs de distribuição, e através de seus alimentadores atendem, diretamente ou via seus ramais, os consumidores primários e transformadores de distribuição. Estes são *estações transformadoras* (ETs) para suprimento da rede secundária ou de baixa tensão. (Kagan *et al.*, 2005).

As próximas seções deste capítulo tratam o sistema de distribuição com mais enfoque, destacando os principais elementos que o compõem, além de aspectos construtivos e topológicos das redes.

2.2. Os Sistemas de Distribuição

2.2.1. Rede de Distribuição Primária

A rede primária consiste a parte do sistema que está entre as subestações de distribuição e as estações transformadoras, sendo também denominada rede de média tensão. Os alimentadores que a compõe geralmente operam em tensões padrão na faixa de 11,9kV a 34,5kV. Este alimentador primário é composto por um circuito trifásico, à três ou quatro fios (para operação em delta ou estrela multiaterrado, respectivamente), que estruturam o tronco, de onde alguns ramais bifásicos ou monofásicos podem ser derivados.

Isto posto, pode-se enxergar os alimentadores como um conjunto de barras ligadas entre si por trechos de linhas, sendo que cada trecho apresenta características próprias, como: comprimento, tipo e bitola dos condutores, configuração espacial dos cabos, barras de origem e barra destino. Toda linha que compõe a rede primária apresenta um conjunto de parâmetros que levam o nome de “constantes quilométricas” da linha. Esse nome se origina pelo fato de os parâmetros serem medidos ou calculados para um comprimento de linha de um quilômetro. O modelo da linha apresentará parâmetros série: as resistências ôhmicas, indutâncias próprias e mútuas; e parâmetros *shunt*: capacitâncias e condutâncias, que usualmente são desprezíveis em linhas de distribuição (Kagan *et al.*, 2005). O conjunto de características desses trechos de linha são denominadas configurações ou arranjos, que apresentam os mesmos valores de constantes quilométricas e tendem a se replicar na extensão do circuito.

Essa rede fornece energia a consumidores primários: indústrias de médio porte, conjuntos comerciais, grandes hospitais, shopping centers, instalações de iluminação pública, etc.; e transformadores de distribuição, que atendem ao sistema de distribuição secundário, abastecendo: pequenos comércios e indústrias e, principalmente, consumidores residenciais. Tais cargas encontram-se instaladas nas barras, previamente mencionadas.

O alimentador primário pode ser aéreo ou subterrâneo, com redes aéreas dos tipos: convencional, compacta protegidas ou compacta isoladas, que serão apresentadas em mais detalhes posteriormente. No Brasil, os sistemas aéreos são corriqueiramente implantados em virtude da maior facilidade de reparo e por possuir preços mais acessíveis. No entanto, em regiões de alta densidade de carga ou que apresentam restrições paisagísticas, a instalação de redes subterrâneas se faz necessária, visto que estas proporcionam um maior nível de confiabilidade e menores impactos visuais.

As redes primárias podem ser projetadas de modo a apresentar configurações *radial simples* ou *radial com socorro*, o que é definido com base no grau de confiabilidade requerido para aquele trecho de alimentador, sendo portanto função da importância ou localização da carga a ser atendida (Kagan *et al.*, 2005).

Os sistemas radiais simples são o tipo mais comum de alimentação sendo mais adequado para áreas de baixa densidade de carga, em especial quando os circuitos tomam direções distintas, tornando caro e difícil o estabelecimento de interligações entre os ramos. Nestes sistemas o fluxo de potência apresenta sentido único: a partir da subestação e rumo às cargas. A confiabilidade dessa configuração é baixa, uma vez que quando da perda do alimentador ou circuito de distribuição geral não existe recurso para manobra e o fornecimento de energia é interrompido (COPEL, 1999; Montemezzo, 2016).

Os sistemas radiais com socorro, por outro lado, são mais adequados para áreas que possuam maiores densidades de carga ou que requeiram uma operação de maior confiabilidade, como hospitais, centros de computação e similares. Nesta configuração, uma situação de perda eventual de um dos circuitos de distribuição ou alimentação não deve afetar ou interromper o fornecimento de energia, a menos que o sistema esteja operando temporariamente como radial simples ou durante um período de manobra de chaves. Se caracterizam por um fluxo de potência que pode ser orientado por trajetos diversos até as cargas do circuito, dependendo da configuração de manobra. Entre alimentadores adjacentes é comum a existência de interligação, por meio de chaves que operam normalmente abertas (NA), podendo serem fechadas em manobras para transferência de carga. Além disso, dispõem de chaves seccionadoras que operam normalmente fechadas (NF), que se destinam a isolar blocos de cargas, em condições de manutenção preventiva ou corretiva. Desta forma, em vista da ocorrência de um defeito, detectado por uma equipe de manutenção, a manobra adequada dessas chaves de seccionamento permite a isolamento do trecho afetado, e posterior reestabelecimento do suprimento de energia para os outros consumidores. A rede primária com configuração radial com socorro é ilustrada na Figura 3, em que os blocos indicam as chaves normalmente abertas (NA) ou normalmente fechadas (NF) (COPEL, 1999; Kagan *et al.*, 2005; Montemezzo, 2016).

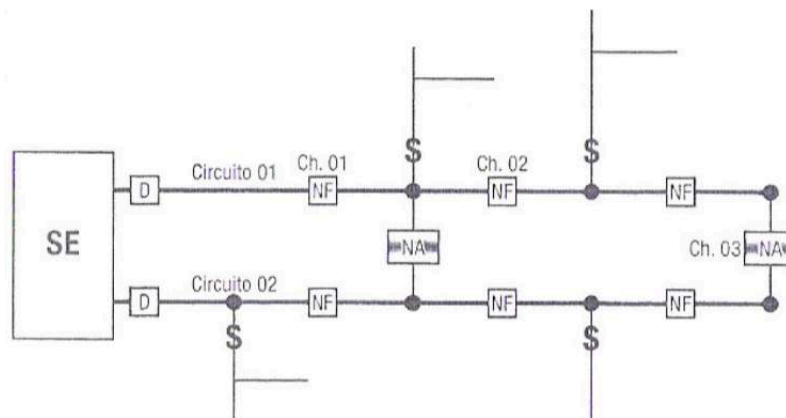


Figura 03 - Diagrama unifilar de rede primária com configuração radial com socorro.
(Fonte: Kagan *et al.*, 2005).

2.2.2. Os equipamentos dos Sistemas de Distribuição

Quando tratamos da análise estática de sistemas de distribuição, por exemplo, o fluxo de potência, os equipamentos que merecem destaque na composição do modelo da rede elétrica são (Massignan, 2016):

(i) **Transformadores de Potência:** transformadores das subestações de distribuição. Estes equipamentos conectam os SDs com os sistemas de transmissão de energia elétrica em tensões mais elevadas;

(ii) **Transformadores de Distribuição:** transformadores que conectam a rede primária em média tensão com a rede secundária em baixa tensão. Alimentam os circuitos dos consumidores de energia elétrica, abastecendo principalmente pequenos comércios e indústrias, e os consumidores residenciais.

(iii) **Linhas de Distribuição:** ramais aéreos ou subterrâneos dos circuitos elétricos de distribuição na rede primária. De modo geral são compostos por cabos, postes e cruzetas e de acordo com a disposição geométrica dos condutores (e outras características construtivas) são obtidos os parâmetros elétricos destas linhas;

(iv) **Bancos de Capacitores:** fontes de energia reativa geralmente com o intuito de melhorar o fator de potência e níveis de tensão na rede de distribuição. Podem ser constituídos por mais de um capacitor sendo operados manual ou automaticamente;

(v) **Reguladores de Tensão:** autotransformadores com a função de controlar a tensão ao longo dos alimentadores. Tipicamente possuem medidores de corrente e tensão para realizar o controle de tensão;

(vi) **Chaves Seccionadoras e Disjuntores:** dispositivos seccionadores capazes de isolar eletricamente partes dos circuitos dos SDs. O estado operativo destes equipamentos é importante na determinação da topologia da rede elétrica do alimentador.

Na Figura 4 é apresentado um diagrama unifilar de um alimentador de distribuição típico, e a disposição dos equipamentos anteriormente citados.

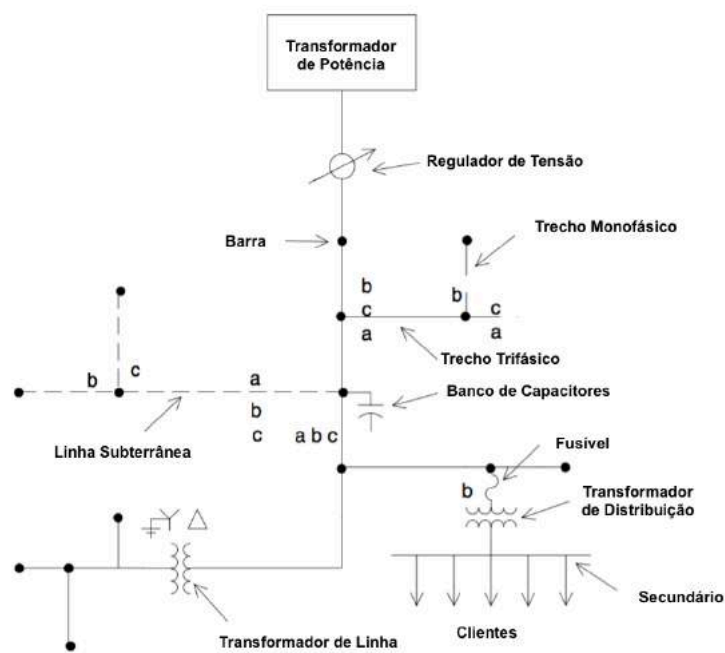


Figura 04 - Diagrama unifilar de um alimentador simples. (Fonte: Kersting, 2002)

2.3. Tipos de redes de Distribuição de Energia Elétrica

São quatro os tipos de redes de distribuição de energia elétrica: aérea convencional, aérea compacta, aérea isolada e subterrânea. Esta seção traz alguns detalhes sobre cada uma dessas redes.

2.3.1. Rede de distribuição aérea convencional

Trata-se do tipo de rede elétrica mais comumente encontrado no Brasil, e tem como característica a disposição dos condutores horizontalmente, apoiados sobre isoladores que estão fixados em cruzetas (de madeira, fibra, plástico ou metal), na média tensão. No caso de postes que possuem os circuitos primário e secundário, a média tensão se encontra no topo do transformador, e a baixa tensão estará abaixo, como ilustra a Figura 05.

Os condutores utilizados são cabos de alumínio nus, ou seja, sem proteção ou isolamento. Por esta razão as redes encontram-se desprotegidas e predispostas à ocorrência de faltas (ou curto circuitos), que podem ocorrer, por exemplo, por contato de galhos de árvores com os cabos. Esse tipo de falta geralmente acarreta em interrupções no fornecimento de energia, além do comprometimento das cargas alimentadas, como iluminação pública e equipamentos eletrônicos residenciais.

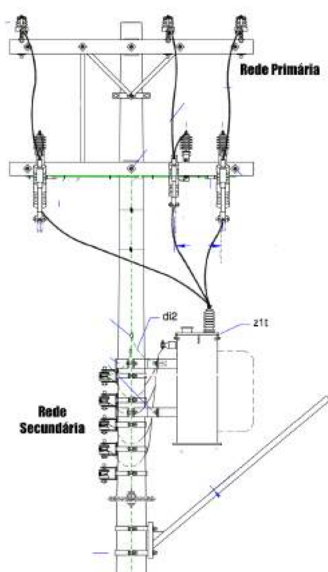


Figura 05 - Configuração espacial dos condutores de linhas aéreas convencionais da rede primária e secundária. (Fonte: Elektro, 2014)

2.3.2. Rede de Distribuição Aérea Compacta

A rede de distribuição compacta protegida é constituída por um conjunto de três cabos com cobertura de polietileno reticulado (XLPE), um composto resistente a radiação solar, abrasão e com elevada resistência ao trilhamento elétrico, o que aumenta sua vida útil. Esses condutores por sua vez são sustentados por um cabo mensageiro de aço (com 9,5 mm de diâmetro, e alta resistência), fixado aos postes por meio de um braço suporte, que exercem a função de absorver o esforço mecânico da rede. Além disso, o cabo mensageiro carrega espaçadores losangulares poliméricos (polietileno de alta densidade), que são distribuídos em intervalos regulares de modo a acomodar os condutores fase em um arranjo triangular compacto. (CPFL, 2016)

Apesar de serem revestidos, esses condutores não podem ser considerados isolados, uma vez que o campo elétrico não permanece confinado no dielétrico da isolamento do cabo. (Montemezzo, 2016) No entanto, o revestimento permite eventuais contatos de galhos de árvores sem ocasionar faltas elétricas capazes de interromper o fornecimento de energia. Desta forma, a configuração compacta em si ocupa bem menos espaço que as redes convencionais, viabilizando a passagem da linha em regiões que, face à obstáculos, era difícil a utilização da rede comum, com cruzeta. Outra vantagem é reduzir a frequência de podas de árvores nas proximidades das linhas de distribuição de média e baixa tensão. Isto resulta numa maior confiabilidade e qualidade no serviço de fornecimento de energia em comparação às redes convencionais, o que vem acompanhado de um custo por quilômetro maior que o anterior.

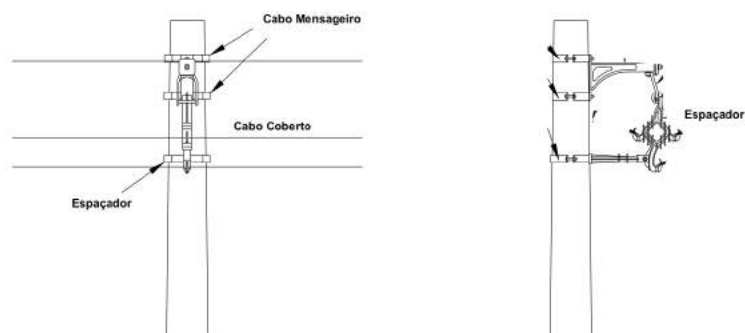


Figura 06 - Elementos da rede compacta: cabo mensageiro, cabos de fase, espaçador polimérico e o braço suporte tipo “L”. (Fonte: CPFL, 2016)

2.3.3. Rede de Distribuição Aérea Isolada

Neste tipo de rede são utilizados cabos multiplexados, onde os condutores fase apresentam isolamento com cobertura sólida de polietileno reticulado (XLPE) entre as camadas semicondutoras de composto termofixo, com blindagem metálica e cobertura de polietileno (PE). Na média tensão, esses cabos se encontram dispostos helicoidalmente em torno de um cabo mensageiro de aço (ou liga de alumínio) de 9,5mm de diâmetro, responsável pela sustentação dos mesmos. A Figura apresenta o modelo de cabo utilizado em redes isoladas que operam na faixa de tensão de 20/35 kV, sendo:

- A. Cabo mensageiro em aço galvanizado;
- B. Condutor de alumínio;
- C. Blindagem semicondutora do condutor;
- D. Isolação;
- E. Blindagem semicondutora da isolamento;
- F. Blindagem metálica;
- G. Cobertura.

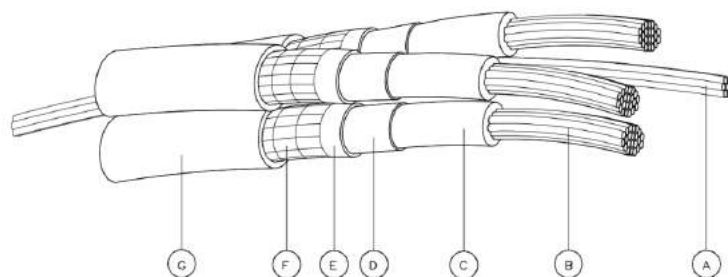


Figura 07 - Cabo de Alumínio Isolado Multiplexado 20/35 kV autossustentado por mensageiro de aço galvanizado. (Fonte: Montemezzo, 2016)

Em geral as redes de distribuição isoladas, ilustradas na Figura 08, tem aplicações específicas, sendo instaladas em locais densamente arborizados, onde galhos em contato permanente poderiam causar falhas se fossem instalados outro tipo de rede. Ambientes propícios à abertura de arcos elétricos também requerem instalações deste tipo, por apresentar proteção e isolamento suficiente para que os condutores sejam trançados entre si.

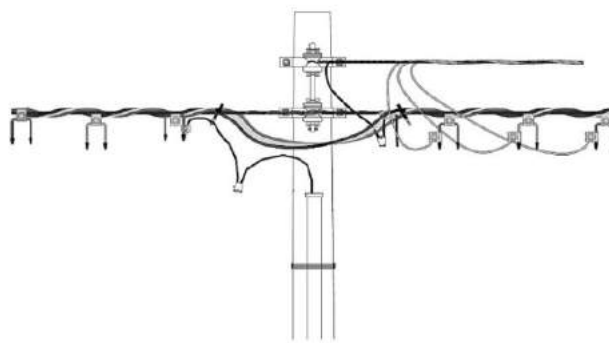


Figura 08 - Configuração dos condutores de linhas aéreas compactas isoladas.
(Fonte: Montemezzo, 2016)

2.3.4. Rede de distribuição subterrânea

As redes de distribuição de energia elétrica subterrâneas são instaladas em galerias compostas por bancos de dutos e caixas de passagem, por onde se estende uma rede de cabos completamente isolados (concêntricos ou blindados), além de câmaras para abrigo de transformadores e outros equipamentos elétricos. Essas instalações estão exemplificadas nas imagens da Figura 09.



Figura 09 - Bancos de dutos e câmara para instalação de equipamentos em área de alta densidade de carga. (Fonte: COPEL, 2010)

Alguns condutores podem opcionalmente serem enterrados diretamente no solo caso possuam uma camada especial de material plástico protetor, sendo denominados cabos “air bag”. Esses cabos são bastante robustos, apresentando alta durabilidade e resistência a impactos. Deste modo, por não necessitarem instalação em dutos, reduzem consideravelmente os gastos em mão-de-obra nas instalações subterrâneas, o que reduz seu custo de implementação.

As instalações subterrâneas podem ser de dois tipos: semienterradas ou totalmente subterrâneas. No primeiro tipo, alguns equipamentos da rede são instalados sobre o solo, mas os cabos são enterrados. Já as redes totalmente subterrâneas tem a característica de possuir todo o cabeamento e equipamentos elétricos em galerias. Além disso, essas redes podem operar utilizando sistemas dos tipos: Reticulados (Network), Anel Aberto, Dupla Alimentação, Radial com Socorro. Por essas e outras características esse tipo de instalação se torna indicado para áreas urbanas onde a rede aérea é inviável por conta da alta densidade de carga, que ocasiona um congestionamento de equipamentos elétricos, ou em locais em que se deseja pouco ou nenhum impacto visual (COPEL, 2010; Montemezzo, 2016).

Além de serem propícias para locais onde fatores estéticos devem ser levados em conta, as redes subterrâneas proporcionam o maior nível de confiabilidade e qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica, dado que estão protegidas de tempestades e fenômenos naturais que podem acarretar falhas com interrupção do fornecimento de energia. Isto por sua vez resulta em menores custos de operação e de manutenção corretiva. No entanto, o custo elevado para sua implantação das redes subterrâneas restringe a abrangência dessas instalações à cenários e condições específicas.

3. Parâmetros Trifásicos de Linhas de Sistemas de Distribuição

3.1. Considerações Gerais

Parâmetros como resistência, indutância, condutância e capacitância de uma linha são primordiais para análise do comportamento de tensões e correntes num sistema de distribuição, uma vez que se relacionam diretamente com o comportamento físico de uma linha de distribuição. Desta forma, as linhas polifásicas são descritas matematicamente por matrizes de seus parâmetros série e *shunt*: as matrizes de impedância série por unidade de comprimento e admitância *shunt* por unidade de comprimento (Kagan *et al.*, 2005; Montemezzo, 2016). A primeira é composta por resistências somadas a reatâncias indutivas próprias e mútuas da linha, enquanto que a segunda é formada por condutâncias e susceptâncias capacitivas. No geral, esses parâmetros são calculados para comprimentos de linha de um quilômetro, e portanto recebem o nome de “constantes quilométricas”, podendo ser definidas tanto em termos de componentes de fase quanto em termos de componentes simétricas.

Para a obtenção das constantes quilométricas das linhas de distribuição do alimentador da CPFL, será utilizado o método das imagens de Carson. O método consiste em considerar a rede de distribuição como uma integração de seus condutores reais acima do solo e as suas imagens em relação ao plano do solo, conforme mostra a Figura 10, meramente ilustrativa do método para um sistema de transmissão. Os condutores de fase são então numerados sequencialmente, e em seguida cabos guarda e neutro, nesta ordem, caso estes existam na rede em questão. A partir daí, se estabelece um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais com eixo das abcissas sobre o plano do solo, onde se define as coordenadas dos centros de cada condutor no sistema. (Kagan *et al.*, 2005).

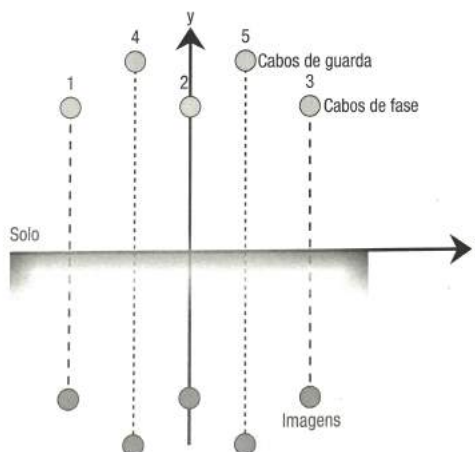


Figura 10 - Método das imagens e o sistema de coordenadas para os centros dos condutores.
(Fonte: Kagan *et al.*, 2005)

Fica evidente neste primeiro momento que a configuração geométrica dos condutores na estrutura da cruzeta é um dos fatores que influenciam no cálculo das constantes quilométricas de linhas aéreas. Além disso, o próprio condutor e suas características construtivas serão de grande importância para os cálculos a serem executados. Por fim, a condutividade do solo também tem sua influência nas constantes quilométricas das linhas.

O presente capítulo vai tratar da metodologia para obtenção de cada um desses parâmetros, primeiramente apresentando o método de cálculo de impedâncias próprias e mútuas por quilômetro, para linhas aéreas convencionais e compactas de cabo isolado. Em seguida, apresenta o cálculo das admitâncias próprias e mútuas por quilômetro, também para as linhas aéreas e compactas de cabo isolado. Tais parâmetros serão utilizados na determinação da matriz de impedância série e da matriz de admitâncias *shunt* que auxiliaram na construção de um modelo para as linhas do alimentador do sistema de distribuição da CPFL em capítulos subsequentes. A formulação utilizada nas seções seguintes são encontradas no livro “Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica” de Nelson Kagan (2005).

Vale ressaltar que, como em geral as ferramentas de análise de sistemas de distribuição fazem uso de modelos a três fios, o trabalho será direcionado para este tipo de modelagem. Deste modo, em caso de linhas que apresentem outros condutores (como o neutro) além das fases (a,b,c), deverá ser utilizada a redução de Kron transferindo os efeitos dos condutores extras para os condutores das fases.

3.2. Constantes quilométricas de cabos nus

3.2.1. Impedância série de linhas aéreas

A impedância série por quilômetro de uma linha consiste em um número complexo no qual a parte real é a resistência do condutor e a parte imaginária a reatância resultante dos campos magnéticos que o circundam. Geralmente, para as linhas de distribuição, a resistência pode ser definida por meio de tabelas dos condutores ou mesmo em catálogos de fabricantes. A reatância, por outro lado, é calculada levando em conta a configuração geométrica da linha e as características do condutor utilizado.

O fato de o sistema de distribuição trifásico, com linhas não transpostas, apresentar assimetria entre os condutores e cargas desequilibradas resulta em enlaces de fluxos magnéticos distintos e, conseqüentemente, indutâncias diferentes para cada fase. Sendo assim se faz necessário calcular tanto as impedâncias próprias como as mútuas dos condutores (Kagan *et al.*, 2005).

A determinação dos elementos série de linhas polifásicas é baseada no método das imagens de Carson, previamente citado. O procedimento tem início na montagem da matriz de impedâncias dos elementos série, considerando a condutividade do solo infinita, e de novo seguindo a ordem de numeração dos condutores, cujos termos na unidade de Ω/km são obtidos a partir da seguinte formulação:

$$Z_{ik} = 0,0 + j4\pi f 10^{-4} \ln \frac{D_{ik'}}{D_{ik}} \quad (i = 1, \dots, n \text{ e } i \neq k) \quad (1)$$

$$Z_{ii} = R_{ii} + j4\pi f 10^{-4} \ln \frac{D_{ii'}}{r_i'} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

onde,

f frequência da rede, em Hz;

r_i' raio médio geométrico do condutor, em unidade compatível com $D_{ii'}$;

R_{ii} resistência ôhmica do condutor em corrente alternada, corrigida para a temperatura de operação e levando em conta os efeitos pelicular e de proximidade;

$D_{ii'}$ distância entre o condutor i e sua imagem i' ;

$D_{ik'}$ distância entre o condutor i e a imagem do condutor k' ;

Z_{ii} e Z_{ik} equivalem à impedância própria e impedância mútua, respectivamente.

O cálculo da “resistência ôhmica efetiva” de um condutor é dado pela relação entre potência dissipada no condutor, por efeito Joule, e a corrente que o percorre. Deste modo, a uma temperatura “ t ” do condutor, tem-se a seguinte formulação:

$$R_t = \frac{\text{Potência dissipada no condutor}}{I^2} \quad (3)$$

onde R_t tem unidade Ω/km , a potência dissipada em W/km e a corrente em A.

Em contrapartida, a resistência em corrente contínua de um condutor, $R_{CC}(t)$ é dada pela seguinte equação:

$$R_{CC}(t) = \rho_t \frac{\ell}{S} \quad \Omega \quad (4)$$

onde usualmente são definidas as unidades de Ω/km para a resistência ôhmica, a resistividade, ρ_t , em $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$, o comprimento do cabo, ℓ , em km e a seção reta do condutor, S , em mm^2 .

Isto posto, é importante destacar que para que houvesse igualdade entre resistência efetiva e a resistência em corrente contínua, a distribuição do campo de correntes no interior do condutor deveria ser uniforme. No entanto, a existência de um campo variável no tempo, no interior do condutor, se traduz no adensamento da corrente na superfície do mesmo, o que é denominado *efeito pelicular*. Isto ocasiona um aumento na resistência do condutor. Um outro efeito, decorrente de campos produzidos

por cabos vizinhos, conhecido por *efeito de proximidade*, também gera distorções na distribuição de correntes, o que, por consequência, impacta o valor de resistência dos mesmos. (Kagan, *et al.*, 2005)

Além dos efeitos pelicular e de proximidade, também outro fator influencia na resistência ôhmica do condutor: a temperatura. Isto ocorre pois a resistividade dos materiais varia linearmente com a temperatura, o que é descrito pela seguinte equação:

$$\rho(t) = \rho(20)[1 + \alpha_{20} \cdot (t - 20)] \quad (5)$$

onde,

α é o coeficiente de variação da resistividade e, a 20°C tem valor 0,00403°C⁻¹ para o alumínio (Kagan *et al.*, 2005).

Isto posto, é importante inicialmente corrigir o valor de resistência ôhmica tabelada do condutor, para a temperatura de operação. Em seguida, a resistência pode ser corrigida levando em conta os efeitos de pelicularidade e proximidade.

A resistência em corrente contínua na temperatura de operação, t_{op} , é dada pela seguinte formulação:

$$R_{CC-op} = R_{CC-20} [1 + \alpha \cdot (t_{op} - 20)] \quad (6)$$

A correção da resistência levando em consideração o efeito pelicular (Kagan *et al.*, 2005) utiliza das seguintes equações:

$$Y_S = \frac{X_S^4}{192 + 0,8X_S^4} \quad \text{onde} \quad X_S^2 = \frac{8 * \pi * 60}{R_{CC-op}} * 10^{-4} K_S \quad (7)$$

em que,

R_{CC-op} resistência em corrente contínua, para a temperatura " t_{op} ", em Ω/km ;

f frequência da rede, em Hz;

K_S coeficiente determinado experimentalmente levando em conta o tipo de construção do cabo;

A equação para a correção da resistência em corrente alternada devido ao efeito de proximidade é:

$$Y_P = \frac{X_S^4}{192 + 0,8X_S^4} \left(\frac{d_{cond}}{s_{eq}} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_{cond}}{s_{eq}} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{X_S^4}{192 + 0,8X_S^4} + 0,27} \right] \quad (8)$$

$$\text{com } X_P^2 = \frac{8 * \pi * 60}{R_{CC}} * 10^{-4} K_p$$

d_{cond} diâmetro do condutor, em mm;

s_{eq} média geométrica da distancia entre o eixo dos três cabos, em mm;

K_p coeficiente determinado experimentalmente levando em conta o tipo de construção do cabo.

A resistência ôhmica do condutor, corrigida para a temperatura de operação e levando em conta os efeitos pelicular e de proximidade pode ser finalmente formulada da seguinte maneira:

$$R_{CA-op} = R_{CC}(1 + Y_s + Y_p) \quad (9)$$

Como na realidade tem-se um valor finito para a condutividade do solo, ρ_{solo} , deve-se modificar a matriz de impedâncias através de termos corretivos obtidos pelas equações de Carson. Os termos corretivos utilizados na prática levam em consideração somente as primeiras parcelas da série infinita de Carson, resultando:

$$Z_{ik} = R_{ik} + \Delta R_{ik} + j[X_{ik} + \Delta X_{ik}] \quad (i = 1, \ell, n) \quad (10)$$

$$\Delta R_{ii} = \omega \left(1,5708 - 0,0026492 D_{ii'} * \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}} \right) 10^{-4} \quad (11)$$

$$\Delta X_{ii} = 2\omega \left(\ln \frac{658,898}{D_{ii'} \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}}} + 0,002649 \frac{D_{ii'}}{2} * \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}} \right) 10^{-4} \quad (12)$$

$$\Delta R_{ik} = \omega \left(1,5708 - 0,0026492 \frac{D_{ii'} + D_{kk'}}{2} * \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}} \right) 10^{-4} \quad (13)$$

$$\Delta X_{ik} = 2\omega \left(\ln \frac{658,898}{D_{ik'} \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}}} + 0,002649 \frac{D_{ii'} + D_{kk'}}{4} * \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}} \right) 10^{-4} \quad (14)$$

Depois de aplicados os termos corretivos de Carson a linha fica equacionada em termos de sua matriz de impedâncias $[Z_{rede}]$ como mostrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} V_f \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ff} & Z_{fg} \\ Z_{gf} & Z_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ I_g \end{bmatrix} \quad (15)$$

onde, o subscrito ff representa a matriz de impedâncias próprias e mútuas dos condutores fase, os subscritos fg e gf , as matrizes de impedâncias mútuas entre cabos guarda (ou neutro) e finalmente gg , representa a matriz de impedâncias próprias e mútuas do(s) cabo guarda.

Procede-se então para a eliminação dos cabos guarda (neutro), e em seguida modifica-se a matriz para que seja levada em conta o efeito das transposições, o que não será abordado aqui devido as características da linha em estudo.

O processo é finalizado depois de obtida a matriz de impedâncias série em termos de componentes simétricas, por meio da transformação de “*spinor*”, cuja formulação é:

$$[Z_{0,1,2}] = [T]^{-1} [Z_{rede}] [T] \quad (16)$$

Sendo a *matriz* $[T]$ dada por:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad \text{sendo } \alpha = 1 \angle 120^\circ \quad (17)$$

3.2.2. Cálculo da admitância em derivação – Capacitância *Shunt*

A obtenção das capacidades shunt da linha aérea parte da montagem da *matriz* $[P]$, dos coeficientes de potenciais de Maxwell (Kagan *et al.*, 2005). Os termos de tal matriz são dados pela seguinte formulação:

$$P_{ii} = K * \ln \left[\frac{D_{ii'}}{r_i} \right] \quad (i = 1, \dots, n) \quad (18)$$

$$P_{ik} = K * \ln \left[\frac{D_{ik}}{D_{ik'}} \right] \quad (i = 1, \dots, n \text{ e } i \neq k) \quad (19)$$

onde,

$$K = 2 * c^2 * 10^{-4} = 18 * 10^6 \text{ km/F} = 18 \text{ km}/\mu\text{F}$$

(sendo a unidade $1/F$ considerada “*daraf*”);

c é a velocidade da luz, em km/s ;

$D_{ii'}$ é a distância entre o centro do condutor i e sua imagem i' ;

$D_{ik'}$ é a distância entre o centro do condutor i e o da imagem k' , do condutor k ;

r_i é o raio do condutor i .

Aqui se destaca a importância de todas as distâncias e o raio estarem na mesma unidade.

Seguindo a numeração dos condutores a matriz dos coeficientes de potencial $[P]$ pode ser montada como segue:

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{ff} & P_{fg} \\ P_{gf} & P_{gg} \end{bmatrix} \quad (20)$$

onde,

$[P_{ff}]$ representa a submatriz dos cabos fase;

$[P_{gg}]$ representa a submatriz dos cabos guarda;

$[P_{fg}] = [P_{gf}]^t$ representa a submatriz das mútuas entre os cabos fase e os cabos guarda;

Para calcular a *matriz* $[Y]$, das admitâncias nodais, basta se inverter a *matriz* $[P]$

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{ff} & Y_{fg} \\ Y_{gf} & Y_{gg} \end{bmatrix} = j\omega [P]^{-1} \quad (21)$$

onde,

$[Y_{ff}]$ representa a submatriz das admitâncias dos cabos fase;

$[Y_{gg}]$ representa a submatriz das admitâncias dos cabos guarda;

$[Y_{fg}] = [Y_{gf}]^t$ representa a submatriz das admitâncias mútuas entre os cabos fase e os cabos guarda;

Em termos de sua matriz de admitâncias, a linha fica equacionada da seguinte maneira (Kagan *et al.*,2005):

$$\begin{bmatrix} I_f \\ I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ff} & Y_{fg} \\ Y_{gf} & Y_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ V_g \end{bmatrix} \quad (22)$$

Neste equacionamento, $[I_f]$ e $[I_g]$ representam as submatrizes das correntes nos cabos de fase e de guarda (neutro) respectivamente; $[V_f]$ e $[V_g]$ representam as submatrizes das tensões nos cabos de fase e de guarda (neutro). O subscrito *ff* representa a matriz de impedâncias próprias e mútuas dos condutores fase, os subscritos *fg* e *gf*, as matrizes de impedâncias mútuas entre cabos guarda (ou neutro) e finalmente *gg*, representa a matriz de impedâncias próprias e mútuas do(s) cabo guarda.

Os próximos passos seriam a eliminação dos cabos guarda e em seguida efetuar a transposição das linhas. No entanto, esses são passos dispensáveis no caso deste trabalho em específico uma vez que as linhas de distribuição estudadas não apresentam transposição ou cabos guarda. Deste modo, a *matriz* $[Y_{ff}]$ é a única pertinente.

Finalmente, por meio de uma transformação “*spinor*”, é possível obter a matriz de admitâncias em termos de componentes simétricas, de modo análogo ao apresentado para a matriz de impedâncias.

3.3. Constantes quilométricas de cabos isolados

3.3.1. Considerações gerais

O método de cálculo das constantes quilométricas de cabos isolados considera como distintos as partes interna e externa ao cabo. Considerando um sistema com n cabos, as matrizes $[Z]$ e $[Y]$ são, respectivamente, as matrizes de impedâncias e admitâncias da linha dos cabos envolvidos. Caso a rede seja constituída por cabos unipolares, com três elementos metálicos (condutor, blindagem e armação), imersos no ar ou diretamente enterrados, cada uma dessas matrizes é constituída pela seguinte soma:

$$\begin{aligned} [Z] &= [Z_i] + [Z_0] \\ [P] &= [P_i] + [P_0] \\ [Y] &= j\omega[P]^{-1} \end{aligned} \quad (23)$$

onde, o sufixo i refere-se a parte interna do cabo, e "0" à parte externa. As equações diferenciais que regem o funcionamento da rede são:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} [V] &= -[Z][I] \\ \frac{\partial}{\partial x} [I] &= -[Y][V] \end{aligned} \quad (24)$$

As matrizes $[Z_i]$ e $[P_i]$, para cabos compostos de três componentes metálicos, tem dimensão $3n \times 3n$, ou seja,

$$[Z_i] = \begin{bmatrix} [Z_{11}] & \cdots & [0] \\ \vdots & [Z_{ii}] & \vdots \\ [0] & \cdots & [Z_{nn}] \end{bmatrix} \quad (25)$$

Sendo que cada elemento da matriz $[Z_i]$ representa uma matriz 3×3 , cujas linhas e colunas representam condutor, blindagem e armação, nesta ordem, isto é:

$$[Z_{ii}] = \begin{bmatrix} [Z_{cc}] & [Z_{cb}] & [Z_{ca}] \\ [Z_{bc}] & [Z_{bb}] & [Z_{ba}] \\ [Z_{ac}] & [Z_{ab}] & [Z_{aa}] \end{bmatrix} \quad (26)$$

em que os elementos da diagonal principal representam as impedâncias próprias do condutor, blindagem e armação, e os elementos restantes as mútuas entre cada um dos três.

3.3.2. Elementos série - Impedâncias

Como apresentado anteriormente, a matriz de impedâncias dos cabos isolados, num sistema de "n" fios, é composta por:

- $[Z_i]$ matriz das impedâncias internas ao cabo
- e $[Z_0]$ matriz das impedâncias do meio externo aos cabos.

$$[Z] = [Z_i] + [Z_0]$$

No caso da condutividade do solo ser infinita, a matriz $[Z_0]$ é nula. Caso contrário, considerando-se finita a condutividade, tal matriz representa os termos corretivos de Carson (Equações 11, 12, 13 e 14), já apresentados anteriormente.

Para o equacionamento da parte interna, considera-se um cabo unipolar com a seguinte composição: condutor, isolamento, blindagem metálica, capa não metálica e armação metálica. De tal forma, as seguintes constantes do cabo serão utilizadas para o cálculo de sua impedância:

- R_c resistência ôhmica do condutor
- R_{bl} resistência ôhmica da blindagem
- R_{arm} resistência ôhmica da armação metálica
- Z_{2i} impedância superficial da parte interna da blindagem
- Z_{2e} impedância superficial da parte externa da blindagem
- Z_{3i} impedância superficial da parte interna da armação metálica
- Z_{3e} impedância superficial da parte externa da armação metálica
- Z_0 impedância do solo
- Z_{2m} impedância mútua entre as superfícies interna e externa da blindagem
- Z_{3m} impedância mútua entre as superfícies interna e externa da armação metálica
- Z_{12} impedância mútua entre as superfícies do condutor e da blindagem
- Z_{23} impedância mútua entre as superfícies da blindagem e da armação
- Z_{34} impedância mútua entre as superfícies da armação e do solo
- f frequência da rede $\omega = 2\pi f$ – pulsação
- μ_{bl} permeabilidade relativa da blindagem
- μ_{arm} permeabilidade relativa da armação.

$$\begin{bmatrix} V_C \\ V_{bl} \\ V_{arm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{c bl} & Z_{c arm} \\ Z_{bl c} & Z_{bl bl} & Z_{bl arm} \\ Z_{arm c} & Z_{arm bl} & Z_{arm arm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_C \\ I_{bl} \\ I_{arm} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Onde,

$$\begin{aligned} Z_{cc} &= R_c + Z_{2i} + Z_{2e} + Z_{23} + Z_{3i} + Z_{3e} + Z_{34} - 2(Z_{2m} + Z_{3m}) \\ Z_{c bl} &= Z_{bl c} = Z_{2e} + Z_{23} + Z_{3i} + Z_{3e} + Z_{34} - 2(Z_{2m} + Z_{3m}) \\ Z_{c arm} &= Z_{arm c} = Z_{3e} + Z_{34} - Z_{3m} \\ Z_{bl bl} &= Z_{2e} + Z_{23} + Z_{3i} + Z_{3e} + Z_{34} \\ Z_{bl arm} &= Z_{arm bl} = Z_{3e} + Z_{34} - Z_{3m} \\ Z_{arm arm} &= Z_{3e} + Z_{34} \end{aligned} \quad (28)$$

Sendo:

$$m_{bl} = \sqrt{j \frac{\omega \mu_{bl}}{\rho_{bl}}} \quad e \quad t_{bl} = r_{bl} - r_{is} \quad (29)$$

$$m_{bl} = \sqrt{j \frac{\omega \mu_{bl}}{\rho_{bl}}} \quad e \quad t_{arm} = r_{arm} - r_{cap}$$

O equacionamento da parte externa é realizado de maneira similar ao apresentado na seção anterior.

3.3.3. Cálculo da admitância em derivação – Capacitância *Shunt*

Aqui o procedimento é análogo ao cálculo feito para os cabos nus. Primeiramente, fazendo a montagem da matriz dos coeficientes de potencial. Considerando que os cabos estão instalados ao ar, deve-se considerar também o efeito da parte externa na matriz dos coeficientes de potencial, acrescentando os seguintes termos corretores:

$$\Delta P_{ii} = 18,0 * \ln \left[\frac{D_{ii'}}{r_{ext,i}} \right] \quad e \quad \Delta P_{ik} = 18,0 * \ln \left[\frac{D_{ik'}}{D_{ik}} \right] \quad em \ km/\mu F \quad (30)$$

Os passos seguintes consistem em:

- Inverter a matriz dos coeficientes de potencial para se obter a matriz de admitâncias;
- Eliminar blindagens e armações, caso existam, lembrando que, para blindagens ou armações aterradas, $V = 0$ e, para as mesmas isoladas, $I = 0$;
- Efetuar transposições caso existam;
- Obter a matriz de capacidades em termos de componentes simétricas, aplicando a transformação de “*spinor*”.

4. Memorial de cálculo dos parâmetros elétricos trifásicos do alimentador da CPFL

4.1. Apresentação dos documentos da CPFL

O alimentador a ser modelado neste trabalho está localizado na cidade de Ribeirão Preto, interior do Estado de São Paulo. A área é de concessão da CPFL Paulista, uma das oito distribuidoras de energia elétrica do Grupo CPFL Energia. O trabalho se tornou possível graças a uma série de dados cedidos pela CPFL através do Engenheiro Alexandre Vieira de Oliveira. Por se tratar de um alimentador real, a modelagem será embasada em normas e especificações técnicas internas da companhia visando: a) respeitar a padronização que rege as atividades das distribuidoras do Grupo CPFL; b) realizar a modelagem do alimentador com fidelidade.

Os dados a serem utilizados no cálculo das constantes quilométricas da rede primária de distribuição trifásica são apresentados no mapa do alimentador, na Figura 11. O detalhe em marrom no canto superior esquerdo é a subestação, e todo destaque em rosa é a extensão do alimentador, que chega a 1,5 km.



Figura 11 - Mapa com destaque no alimentador da CPFL.

No mapa estão destacados: as linhas da rede primária de distribuição bem como o código do condutor empregado (em vermelho), o posicionamento e código de transformadores (em rosa). A Figura 12 mostra no detalhe a disposição dos dados fornecidos.

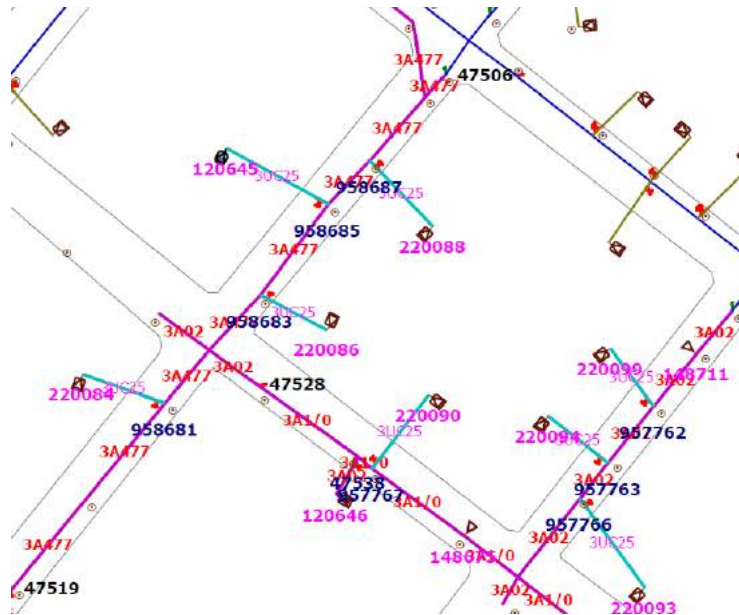


Figura 12 - Detalhe disposição dos dados no documento da CPFL.

Em outro documento, todas as distâncias poste a poste (em vermelho), em metros, são apresentadas no mesmo formato. Pode ser observado, na Figura 13, o detalhe de como são apresentados os dados no documento cedido pela CPFL Paulista.

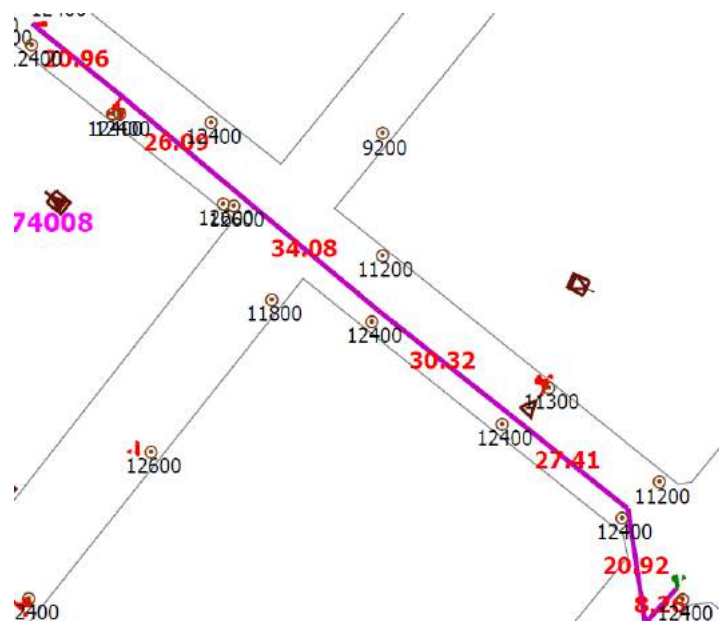


Figura 13 - Detalhe das distância e postes no documento da CPFL.

4.2. Levantamento e organização dos dados

O levantamento dos dados foi realizado manualmente e organizados em planilhas, fazendo uma varredura completa do documento disponibilizado pela CPFL Paulista (Figura 11), para o alimentador em questão: partindo da subestação de origem até a barra final. Foram consideradas barras do sistema: os postes com transformadores (cargas), postes de encabeçamento de fim de linha, e pontos de derivação de ramais do alimentador.

Levantadas o que serão as barras do sistema tem-se conhecimento do posicionamento das cargas no alimentador e uma segmentação das linhas por trechos de barras de origem e barras destino (barras DE/ PARA). Cada segmento pode apresentar um ou mais transformadores conectado na barra destino (Para). Todos transformadores do alimentador foram levantados e identificados na planilha por seu código CPFL. Neste momento também já foram apontadas todas as distâncias barra à barra.

No entanto, não havia informações disponíveis sobre o espaçamento das fases, isto é, do tipo de estrutura de espaçadores das cruzetas de cada poste. Assim sendo, desejando a obtenção de um modelo que levasse em conta esse nível de detalhe, o levantamento dessas informações teve de ser realizado ao longo do alimentador de fato. Isto foi feito com auxílio da ferramenta *Google Street View*. A Figura 14 apresenta uma imagem retirada do *Street View*, para fins de ilustração deste procedimento.



Figura 14 - Estrutura tipo B identificada pelo *Google Street View*

A composição das informações de bitola do condutor utilizado por trecho e a estrutura de espaçamento das fases irão compor o que foram chamadas de “configurações”. Baseado nessas configurações que serão calculadas as constantes quilométricas das linhas, que posteriormente serão atribuídas aos trechos de linha correspondentes. A Tabela 1 traz todos os tipos de configuração levantados ao longo do alimentador em estudo, que totalizam sete no caso das linhas aéreas nuas.

Tabela 01 - Configurações das linhas aéreas nuas.

Configuração	Condutor	Tipo de Cruzeta	AB	BC	AC
			Distância entre fases (mm)		
1	1/0	B	600	600	1200
2	1/0	N	1200	600	1800
3	1/0	M	950	850	1800
4	02	B	600	600	1200
5	02	N	1200	600	1800
6	477	B	600	600	1200
7	477	M	950	850	1800

A tabela com todos os dados de extraídos da documentação cedida pela CPFL encontra-se disponível para consulta do leitor no Apêndice A deste texto.

Nos tópicos a seguir, uma vez que todos dados pertinentes foram coletados, inicia-se o processo de cálculo de fato das constantes quilométricas das linhas. Será apresentado um memorial de cálculo seguindo o passo a passo para a obtenção das constantes quilométricas para a “*Configuração 1*”.

4.3. Rede Primária Aérea Compacta Com Condutores Nus

4.3.1. Da Especificação dos Cabos

A especificação técnica interna “GED-221 Condutores de Alumínio com Alma de Aço” da CPFL padroniza a utilização dos cabos de alumínio com alma de aço na rede primária de distribuição das distribuidoras de energia CPFL Paulista, CPFL Piratininga, CPFL Santa Cruz, RGE, CPFL Jaguari, CPFL Mococa, CPFL Leste Paulista e CPFL Sul Paulista. A Figura 15, retirada da mesma norma técnica, apresenta aspectos construtivos dos condutores de alumínio com alma de aço (CAA) empregados nas redes de distribuição do Grupo CPFL.

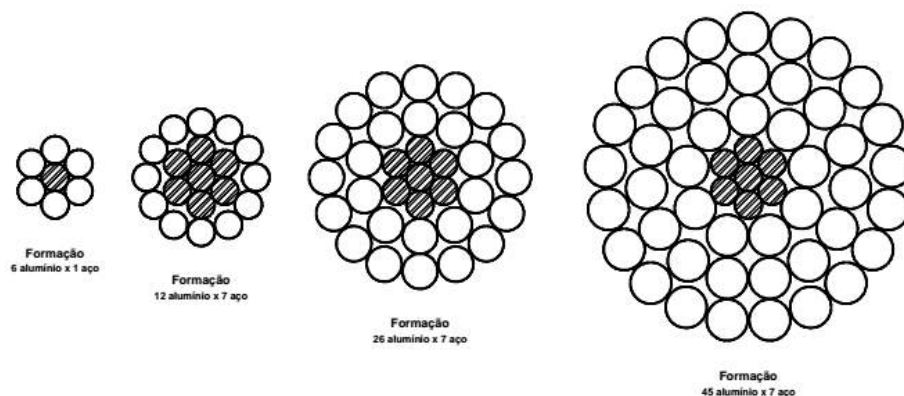


Figura 15 - Aspectos da formação dos cabos CAA (Fonte: CPFL, 2007).

Para os cálculos das constantes quilométricas das linhas aéreas nuas - que representam uma grande porção do alimentador a ser modelado - será utilizada a tabela apresentada na Figura 16. Esta

tabela traz especificações e dados sobre os condutores empregados, tais como: diâmetro e resistência elétrica em corrente contínua (CC).

bitola AWG - MCM	nome do condutor	formação				diâmetro nominal mm	massa nominal kg/km	tração de ruptura daN	Resistência Elétrica em CC a 20°C ohm/ km	Bobina - Lance m	Código de Material		
		Cabo alumínio		Cabo aço							Paulista Piratininga	RGE	Santa Cruz
		número de fios	diâmetro dos fios mm	número de fios	diâmetro dos fios mm								
4	Swan	6	2,12	1	2,12	6,36	85,6	812	1,3547	3570	50000000898	530042	CAB-107
2	Sparrow	6	2,67	1	2,67	8,01	135,8	1246	0,8541	2200	50000000896	530036	CAB-106
1	Robin	6	3	1	3,00	9	171,4	1557	0,6765	1500	-	530034	-
1/0	Raven	6	3,37	1	3,37	10,11	216,34	1904	0,5361	1390	50000000894	530033	CAB-108
2/0	Quail	6	3,78	1	3,78	11,34	272,1	2295	0,4261	2130	50000015487	530035	CAB-109
3/0	Pigeon	6	4,25	1	4,25	12,75	344	2901	0,3371	1500	-	530038	-
4/0	Penguin	6	4,77	1	4,77	14,31	433,2	3644	0,2676	1340	50000000892	530041	CAB-110
134,6	Leghorn	12	2,69	7	2,69	13,45	499,2	6021		2040	50000003329	-	-
300	Ostrich	26	2,73	7	2,12	17,28	613,3	5556	0,1897	1500	-	530240	-
300	Piper	30	2,54	7	2,54	17,78	699,5	6975	0,191	1500	-	530039	-
336,4	Linnet	26	2,89	7	2,25	18,31	688,4	6181	0,1692	1960	50000000900	530251	CAB-136
397,5	Ibis	26	3,14	7	2,44	19,88	811,7	7130	0,1433	1500	-	530040	-
397,5	Lark	30	2,92	7	2,92	20,44	921,6	8918	0,1438	1500	-	530261	-
477	Hawk	26	3,44	7	2,68	21,8	975,8	8538	0,1194	2490	50000000902	530260	-
477	Hen	30	3,2	7	3,20	22,4	1106,7	10426	0,1197	1500	-	530043	-
636	Grosbeak	26	3,97	7	3,09	25,15	1299	11038	0,0883	1870	50000002125	-	-
795	Drake	26	4,44	7	3,45	28,11	1623	13742	0,0705	1590	50000000905	-	-
954	Rail	45	3,7	7	2,47	29,11	1602,8	11254	0,0594	2090	50000003096	-	-

Figura 16 - Tabela de Especificações para os cabos de alumínio com alma de aço. (Fonte: CPFL, 2007)

A Figura 17 relaciona os códigos dos condutores, como apresentados nos mapas do alimentador, com as bitolas dos cabos e tipo de aplicação. Os cabos com códigos com letra inicial A compõem linhas aéreas nuas; códigos iniciados com U são de cabos utilizados em linhas subterrâneas; e códigos com inicial E, cabos empregados na rede primária compacta. Esta tabela pôde ser utilizada na correta identificação dos cabos empregados em cada trecho do alimentador e na diferenciação entre trechos de linha aérea convencional (nua) e trechos de rede primária compacta.

Código	Bitola
A04	04 AWG
A02	02 AWG
A1/0	1/0 AWG
A3/0	3/0 AWG
A4/0	4/0 AWG
A336	336,4 MCM
A477	477 MCM
U1/0 (*)	1/0 AWG
U750 (*)	750 MCM / 500 mm ²
E70 (**)	70 mm ²
E185 (**)	185 mm ²

* Cabos Isolados em Rede Subterrânea

** Cabos da Rede Primária Compacta

Figura 17 - Tabela dos códigos dos condutores e bitola correspondente. (Fonte: CPFL, 2015).

4.3.2. Da Disposição das Fases Na Cruzeta

A especificação técnica contida no documento “GED-10640 Rede Primária Condutores Nus 15kV e 25kV – Estruturas Básicas - Montagem” trata da padronização das estruturas de espaçamento das fases nas cruzetas das redes de distribuição primária nua das distribuidoras de energia do grupo CPFL anteriormente apresentadas.

Ao longo do alimentador, diversas estruturas de cruzetas são encontradas, e com isso, espaçamentos distintos entre as fases. Neste trabalho, por questão de praticidade, serão considerados somente três tipos distintos de estruturas na cruzeta: tipo B, tipo M, tipo N. Tais estruturas estão caracterizadas no padrão técnico CPFL citado acima e são apresentados nas Figuras 18, 19 e 20 para reconhecimento do leitor. Para simplificação, as estruturas utilizadas em aplicações mais específicas, como por exemplo estruturas de encabeçamento de fim de linha, não serão consideradas neste trabalho.

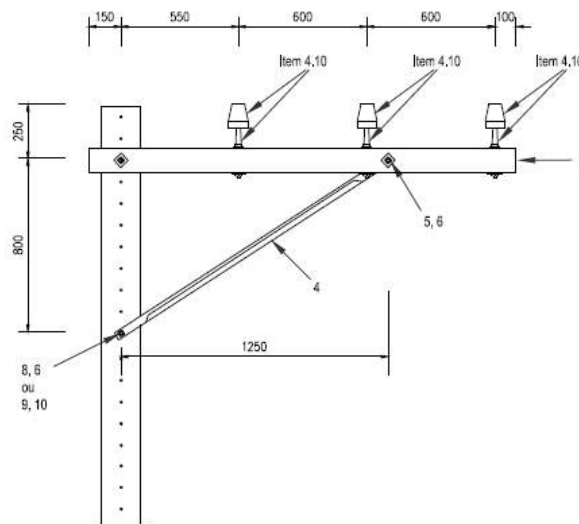


Figura 18 - Estrutura rede primária nua tipo B. (Fonte: CPFL, 2016).

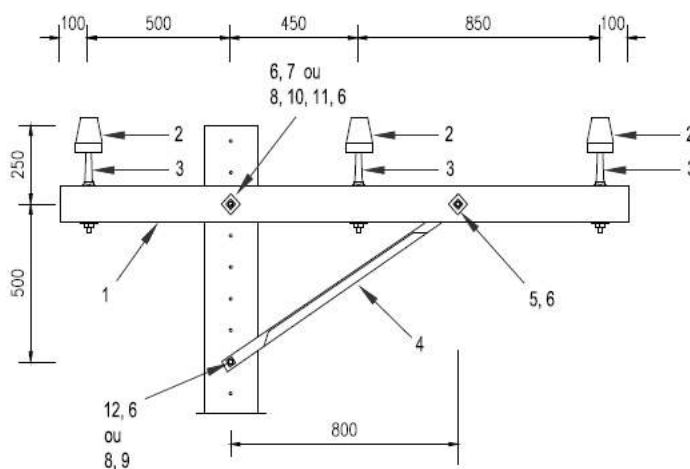


Figura 19 - Estrutura rede primária nua tipo M. (Fonte: CPFL, 2016).

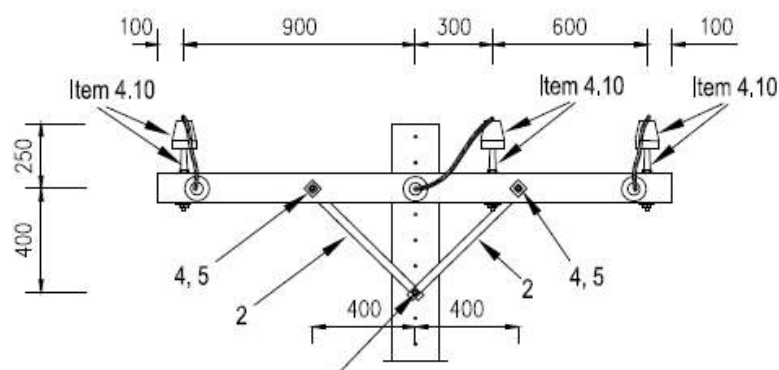


Figura 20 - Estrutura rede primária nua tipo N. (Fonte: CPFL, 2016)

4.3.3. Parâmetros para Cálculos de Constantes Quilométricas das Linhas

A norma técnica interna “GED-3667 Projeto de Rede de Distribuição – Cálculo Elétrico” traz, em seu anexo 2, uma tabela de parâmetros de sequência dos cabos utilizados na composição das redes primária trifásicas de distribuição da CPFL, bem como alguns parâmetros essenciais para o cálculo de tais componentes de sequência. Estes últimos serão utilizados neste trabalho como referência de comparação para o cálculo das constantes quilométricas das linhas áreas nuas. A tabela retirada da mesma norma técnica e apresentada aqui na Figura 21, servirá de referência de comparação para os valores a serem obtidos.

Código	Bitola	R1 (ohm/km)	X1 (ohm/km)	Ro (ohm/km)	Xo (ohm/km)
15 kV					
A04	04 AWG	1,4942	0,4703	1,9040	1,5371
A02	02 AWG	0,9387	0,4527	1,3485	1,5195
A1/0	1/0 AWG	0,5906	0,4352	1,0004	1,5021
A3/0	3/0 AWG	0,3716	0,4177	0,7814	1,4845
A4/0	4/0 AWG	0,2950	0,4089	0,7048	1,4757
A336	336,4 MCM	0,1855	0,3874	0,5953	1,4542
A477	477 MCM	0,1313	0,3742	0,5411	1,4410
C06	06 AWG	1,4854	0,4917	1,8952	1,5585
C04	04 AWG	0,9341	0,4743	1,3439	1,5411
C02	02 AWG	0,5935	0,4510	1,0033	1,5178
C1/0	1/0 AWG	0,3766	0,4352	0,7864	1,5020
C2/0	2/0 AWG	0,3006	0,4266	0,7104	1,4934
C4/0	4/0 AWG	0,1876	0,4088	0,5974	1,4756
U1/0 (*)	1/0 AWG	0,6912	0,151	1,711	0,9534
U750 (**)	750 MCM / 500 mm ²	0,0659	0,114	1,5194	0,754
P240	240 mm ²	0,1622	0,1142	0,64	0,435
P35	35 mm ²	1,1068	0,1515	1,5846	0,8946
E70 (**)	70 mm ²	0,5682	0,2920	1,2335	1,7257
E185 (**)	185 mm ²	0,2112	0,2510	0,8767	1,6847
25 kV					
A04	04 AWG	1,4942	0,4703	1,9040	1,5371
A1/0	1/0 AWG	0,5906	0,4352	1,0004	1,5021
A3/0	3/0 AWG	0,3716	0,4177	0,7814	1,4845
A336	336,4 MCM	0,1855	0,3874	0,5953	1,4542

(*) cabos isolados em trechos subterrâneos

(**) rede primária compacta

Figura 21 - Parâmetros dos cabos utilizados nos cálculos elétricos da CPFL. (Fonte: CPFL, 2015).

Com base neste documento técnico tem-se os seguintes parâmetros considerados padrão da CPFL para o cálculo das constantes quilométricas das linhas:

- Cabos aéreos CAA alumínio com alma de aço;
- Resistividade do solo 600 $\Omega.m$;
- Temperatura dos condutores 50°C;
- Poste padrão de 11 metros;
- Flecha: 0,91m;
- Cruzeta de 2 m;

Observação: o valor da flecha não será utilizado nos cálculos que seguem, visto que foram observadas pequenas distâncias entre postes o que se traduz em flechas pouco consideráveis.

4.3.4. Cálculo das Constantes Quilométricas das Linhas

Nesta seção será apresentado o cálculo das constantes quilométricas da linha trifásica de distribuição primária operando em 13,8kV e frequência de 60 Hz. Os cálculos serão desenvolvidos passo a passo para a “*configuração 1*”.

A *configuração 1* apresenta as seguintes características:

- Condutores *Raven* utilizados nas fases. Com bitola 1/0 AWG, diâmetro de 10,11mm, raio médio geométrico (GMR) de 0,00135m (FUCHS, 1997). A resistência ôhmica em corrente contínua, a 20°C, é de 0,5361 Ω/km . Temperatura de operação 50°C;
 - Geometria da cruzeta: Estrutura tipo B com afastamentos iguais de 0,6 metros entre as fases. A cruzeta está a uma altura de 11 metros do solo;
 - Não há transposição na linha de distribuição;
 - Condutividade do solo 600 $\Omega.m$.
- i. Fixado um sistema de coordenadas com o eixo das abcissas no plano do solo e o eixo das ordenadas passando pelo centro no condutor da fase A. As fases A,B e C serão identificadas por 1, 2 e 3 respectivamente. Assim:

$$X_1 = 0,00m \quad Y_1 = 11,00m$$

$$X_2 = 0,60m \quad Y_2 = 11,00m$$

$$X_3 = 1,20m \quad Y_3 = 11,00m$$

Calcula-se as distancias entre os centros dos cabos e suas imagens:

$$D_{11'} = D_{22'} = D_{33'} = 22 \text{ m}$$

$$D_{12'} = D_{21'} = D_{23'} = D_{32'} = \sqrt{0,6^2 + 22^2} = 20,0081803m$$

$$D_{13'} = D_{31'} = \sqrt{1,2^2 + 22^2} = 20,0327029m$$

- ii. Correção da resistência ôhmica do condutor:

Primeiro fazendo a correção da resistência em corrente contínua para temperatura de operação, 50°C. Utiliza-se da Equação 6, onde α é o coeficiente de variação da resistividade e, a 20°C vale 0,00403°C⁻¹.

$$R_{CC-50} = R_{CC-20} [1 + \alpha \cdot (50 - 20)] = 0,5361(1 + 0,00403 \cdot 30) \\ = 0,60091449 \Omega/km$$

Em seguida, é feita a correção da resistência levando em consideração os efeitos pelicular e de proximidade. Fazendo uso das Equações 7 e 8, respectivamente.

$$X_S^2 = X_P^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10^{-4}}{R_{90}} = \frac{8 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10^{-4}}{0,60091449} = 0,250945$$

$$Y_S = \frac{X_S^4}{192 + 0,8X_S^4} = \frac{0,0629734}{192 + 0,8 \cdot 0,0629734} = 0,0003279$$

$$Y_P = \frac{X_S^4}{192 + 0,8X_S^4} \left(\frac{d_{cond}}{d_{seq}} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_{cond}}{d_{seq}} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{X_S^4}{192 + 0,8X_S^4} + 0,27} \right] \\ = 0,0003279 \left(\frac{10,11}{755,95} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{10,11}{755,95} \right)^2 + \frac{1,18}{0,0003279 + 0,27} \right] \\ = 2,5601 \cdot 10^{-7}$$

Desta forma, a resistência ôhmica do condutor, em CA e corrigida para a temperatura de operação é:

$$R_{CA-50} = 0,60091449(1 + 0,0003279 + 2,5601E - 7) = 0,601112 \Omega/km$$

- iii. Montagem da matriz de impedâncias da rede completa, que, num primeiro momento, será feita considerando condutividade do solo infinita

Sendo $A = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-4} = 0,075398$

$$Z_{11} = Z_{22} = Z_{33} = 0,601112 + j0,075398 \ln \frac{22}{0,00135} = 0,601112 + j0,7312642 \Omega/km$$

$$Z_{12} = Z_{21} = 0,0 + j0,075398 \ln \frac{20,0081803}{0,6} = 0,0 + j0.2716025 \Omega/km$$

$$Z_{13} = Z_{31} = 0,0 + j0,075398 \ln \frac{20,0327029}{1,2} = 0,0 + j0.2194244 \Omega/km$$

$$Z_{23} = Z_{32} = 0,0 + j0,075398 \ln \frac{20,0081803}{0,6} = 0,0 + j0.2716025 \Omega/km$$

A matriz $[Z_{rede}]$ resultante fica:

$$[Z_{rede}] = \begin{bmatrix} 0,601112 + j0,7312642 & 0,0 + j0.2716025 & 0,0 + j0.2194244 \\ 0,0 + j0.2716025 & 0,601112 + j0,7312642 & 0,0 + j0.2716025 \\ 0,0 + j0.2194244 & 0,0 + j0.2716025 & 0,601112 + j0,7312642 \end{bmatrix}$$

- iv. Correção da matriz de impedâncias da rede para condutividade do solo considerada como $600 \Omega.m$
 Caso seja considerada finita a condutividade do solo, ρ_{solo} , modifica-se a matriz de impedâncias através dos termos corretivos obtidos através das equações de Carson, apresentadas neste texto como Equação 10.

$$Z_{ik} = R_{ik} + \Delta R_{ik} + j[X_{ik} + \Delta X_{ik}] \quad (i = 1, \ell, n)$$

Calculando os termos corretores de Carson para cada elemento da matriz $[Z_{rede}]$:

Sendo $\omega = 2\pi f = 376,9911$

$$\begin{aligned} \Delta R_{11} &= \Delta R_{22} = \Delta R_{33} = \\ &= \omega \left(1,5708 - 0,0026492 * (22) * \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}} \right) 10^{-4} = 0,05852295 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{11} &= \Delta X_{22} = \Delta X_{33} = \\ &= 2\omega \left(\ln \frac{658,898}{(22)\sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}}} + 0,002649 \frac{(22)}{2} * \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}} \right) 10^{-4} = 0,3438184 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{12} &= \Delta R_{21} = \Delta R_{13} = \Delta R_{31} = \Delta R_{23} = \Delta R_{32} = \\ &= \omega \left(1,5708 - 0,0026492 \frac{22 + 22}{2} * \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}} \right) 10^{-4} = 0,05852295 \end{aligned}$$

$$\Delta X_{12} = \Delta X_{21} = \Delta X_{23} = \Delta X_{32} =$$

$$= 2\omega \left(\ln \frac{658,898}{20,0081803 \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}}} + 0,002649 \frac{22 + 22}{4} * \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}} \right) 10^{-4} = 0,3451799$$

$$\Delta X_{13} = \Delta X_{31} =$$

$$= 2\omega \left(\ln \frac{658,898}{20,0327029 \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}}} + 0,002649 \frac{22 + 22}{4} * \sqrt{\frac{f}{\rho_{solo}}} \right) 10^{-4} = 0,3450959$$

A Matriz de Correção de Carson resulta:

$$[\Delta Z_{rede}] = \begin{bmatrix} 0,05852295 + j0,3438184 & 0,05852295 + j0,3451799 & 0,05852295 + j0,3450959 \\ 0,05852295 + j0,3451799 & 0,05852295 + j0,3438184 & 0,05852295 + j0,3451799 \\ 0,05852295 + j0,3450959 & 0,05852295 + j0,3451799 & 0,05852295 + j0,3438184 \end{bmatrix}$$

Procedendo as correções de Carson, isto é, somando a matriz com os termos corretivos de Carson a matriz de rede obtida primeiramente se obtém a seguinte matriz de impedâncias da rede:

$$[Z_{rede}] = \begin{bmatrix} 0,6596346 + j1,075082 & 0,05852295 + j0,616778 & 0,05852295 + j0,564520 \\ 0,05852295 + j0,616778 & 0,6596346 + j1,075082 & 0,05852295 + j0,616778 \\ 0,05852295 + j0,564520 & 0,05852295 + j0,616778 & 0,6596346 + j1,075082 \end{bmatrix}$$

- v. Transformação “*spinor*” que resulta na matriz de impedâncias em componentes simétricas, como segue:

$$[Z_{012}] = [T]^{-1} [Z_{rede}] [T] =$$

$$\begin{bmatrix} 0,7766805 + j2,2738061 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,601112 + j0,47572095 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,601112 + j0,47572095 \end{bmatrix}$$

- vi. Montagem da Matriz dos Coeficientes de Maxwell, a partir das Equações 18 e 19, para a obtenção da matriz de admitâncias *shunt*.

$$P_{11} = P_{22} = P_{33} = 18. \ln \frac{D_{11'}}{r_1} = 18. \ln \frac{22}{0,005055} = 150,81156 \text{ km}/\mu F$$

$$P_{12} = P_{21} = 18. \ln \frac{D_{12'}}{D_{12}} = 18. \ln \frac{20,0081803}{0,60} = 64,844032 \text{ km}/\mu F$$

$$P_{23} = P_{32} = 18. \ln \frac{D_{23'}}{D_{23}} = 18. \ln \frac{20,0081803}{0,60} = 64,844032 \text{ km}/\mu F$$

$$P_{13} = P_{31} = 18. \ln \frac{D_{13'}}{D_{13}} = 18. \ln \frac{20,0327029}{1,2} = 0,523837 \frac{\text{km}}{\mu F}$$

vii. Determinação da Matriz de admitâncias da rede completa

Fazendo agora a inversão da matriz [P] temos como resultado a matriz de admitâncias nodais:

$$[Y_{rede}] = j\omega [P]^{-1}$$

$$[Y_{rede}] = j\omega \begin{bmatrix} 0,0084711 & -0,00291605 & -0,00168865 \\ -0,00291605 & 0,00913826 & -0,00291605 \\ -0,00168865 & -0,00291605 & 0,0084711 \end{bmatrix} \mu F / km$$

O valor obtido dos cálculos realizados nesta seção para a obtenção da matriz de impedâncias em termos das componentes simétricas (Configuração 1), podem ser confrontados com os valores apresentados na Figura 21, para conferência. Nesta configuração, que utiliza cabos de bitola 1/0 AWG, a impedância de sequência positiva utilizada nos cálculos elétricos na CPFL tem valor “0,5906 + j0,4352”, enquanto a que foi calculada tem valor “0,6011 + j0,4757”, que se mostram relativamente próximos. Note que, para a impedância de sequência zero, foi encontrada uma divergência maior nos valores de reatância, fato que pode ser explicado pela utilização, por parte da CPFL, de um modelo da rede a 4 fios (com a presença do neutro), que implicaria na redução de Kron que insere nos parâmetros a influência do condutor neutro, o que não é o proposto neste trabalho.

4.4. Rede Primária Aérea Compacta Com Condutores Cobertos

4.4.1. Da Especificação Dos Cabos

A especificação técnica “GED-920 Rede compacta – Cabos cobertos” da CPFL padroniza a utilização dos cabos cobertos nas redes de distribuição primária compactas das distribuidoras de energia CPFL Paulista, CPFL Piratininga, CPFL Santa Cruz, RGE, CPFL Jaguari, CPFL Mococa, CPFL Leste Paulista e CPFL Sul Paulista. A Figura 22 mostra o aspecto construtivo do cabo coberto por XLPE utilizado na composição das redes compactas de distribuição, e a Figura 23 traz as especificações dos cabos cobertos utilizados pela CPFL.

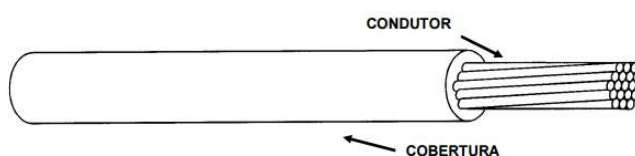


Figura 22 - Desenho do condutor com cobertura XLPE. (Fonte: CPFL, 2012b)

Classe de tensão (kV)	Condutor							Cobertura			Massa aproximada (Kg/km)	Código de Material
	Seção nominal (mm²)	Material	Nº mínimo de fios	Diâmetro externo (mm)		Resistência elétrica máxima C.C. a 20°C (ohms/km)	Carga de ruptura (daN)	Espessura mínima (mm)	Diâmetro externo (mm)			
				mín	máx				mín	máx		
15	16	Cu	6	4,6	4,9	1,160	210	3,0	10,0	12,0	187	50000011329
	35		6	6,8	7,3	0,868	455	3,0	12,8	15,3	190	50000016121
	70		12	9,5	10,0	0,443	910	3,0	15,5	18,0	315	50000011326
	185		30	15,8	16,3	0,164	2405	3,0	21,8	24,3	695	50000011327
	300		30	20,2	21,4	0,100	3977	3,0	26,2	29,4	1070	50000015695
25	35	Al	6	6,8	7,3	0,868	455	4,0	14,8	17,4	235	50000031363
	70		12	9,5	10,0	0,443	910	4,0	17,5	20,1	370	50000002130
	185		30	15,8	16,3	0,164	2405	4,0	23,8	26,4	770	50000002124
34,5	70	Al	12	9,5	10,0	0,443	910	7,6	25,3	28,6	660	50000030901
	185		30	15,8	16,3	0,164	2405	7,6	31,6	34,9	1150	50000016148

- Cabo 35 mm² - Para uso exclusivo em situações especiais de baixa carga.
- Cabo 300 mm² - Para uso exclusivo em situações especiais definidas pelo Planejamento ou Empreendimentos.

Figura 23 - Especificações dos cabos cobertos padronizadas pela CPFL. (Fonte: CPFL, 2012b)

Consultado o documento técnico GED-4951 “Fornecedores de Materiais para Redes de Distribuição Compacta”, foi escolhido o cabo TPR 15kV do fornecedor “Prysmian” como referência para os cálculos deste memorial. O modelo do cabo é desenvolvido para a classe térmica de 90°C, temperatura que será utilizada como temperatura de operação para os cálculos. No alimentador em questão são empregados cabos de 70 mm² e 185 mm² de seção nominal. A tabela de dados dos cabos cobertos fornecidos pelo fabricante é apresentada na Figura 24.

CABOS TPR 15kV							
seção nominal	diâmetro do condutor	diâmetro externo	Rcc a 20 °C	temperatura ambiente de 30 °C			peso
(mm²)	(mm)	(mm)	(Ω/km)	capacidade de corrente 70 °C	capacidade de corrente 90 °C	carga de ruptura	(daN/m)
				(A)	(A)	(daN)	
35	7,1	13,2	0,868	171	207	455	0,19
50	8,2	14,3	0,641	205	248	650	0,23
70	9,8	16,0	0,443	257	312	910	0,31
95	11,5	17,7	0,320	315	382	1.235	0,39
120	13,0	19,2	0,253	365	443	1.560	0,49
150	14,4	20,6	0,206	415	504	1.950	0,57
185	16,0	22,2	0,164	478	581	2.405	0,68
240	18,4	24,6	0,125	567	691	3.120	0,86
300	20,6	26,8	0,100	654	797	3.900	1,04

Figura 24 - Dados dos cabo coberto da classe de 15kV fornecidos pelo fabricante. (Prysmian, 2016)

4.4.2. Do Espaçamento das Fases

A especificação técnica contida no documento “GED-2850 Rede Compacta - Espaçador Losangular Polimérico” trata da padronização dos espaçadores de cabos das distribuidoras de energia CPFL anteriormente apresentadas e será utilizada, neste texto, como medidas espaçamento padrão entre as fases para os cálculos das constantes quilométricas das redes aéreas compactas. Como a rede em questão se encaixa na classe de até 15kV, o espaçamento entre as fases considerado será de 140mm, como pode ser visto na Figura 25 retirada da GED-2850 que mostra o detalhe do espaçador polimérico.

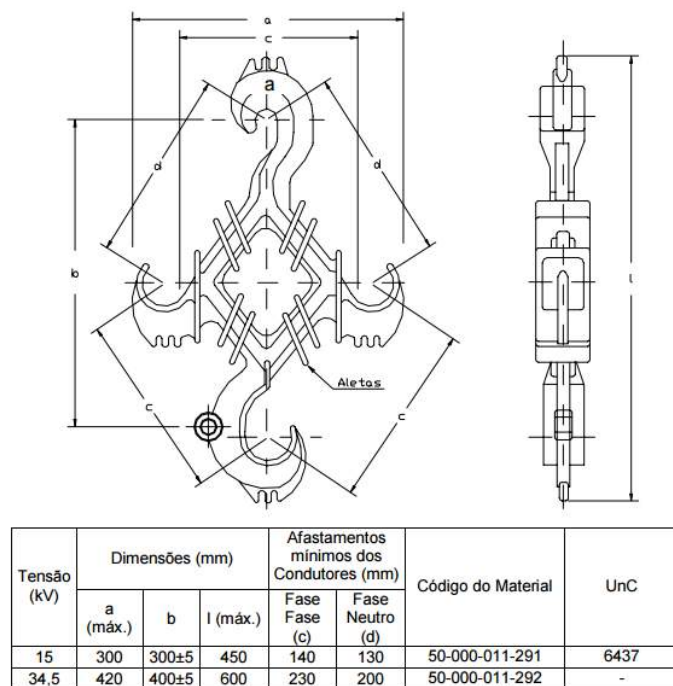


Figura 25 - Padrão técnico do espaçador losangular de redes primárias compactas.
(Fonte: CPFL, 2012a)

4.4.3. Cálculo das constantes quilométricas das linhas aéreas compactas

Constantes quilométricas da linha aérea compacta trifásica de distribuição primária operando em 13,8KV e frequência de 60 Hz.

A configuração 8 apresenta as seguintes características:

- Cabos cobertos TPR, com condutor de alumínio, de diâmetro de 9,8 mm. A resistência ôhmica em corrente contínua, a 20°C, é de 0,443 Ω/km . Temperatura de operação 50°C;
- Isolação em XLPE, termofixo, com espessura de 6,2 mm, diâmetro de 16,0 mm, e constante dielétrica relativa 2,30;
- Cabos não transpostos.
- Instalação ao ar, com os eixos dos cabos espaçados de 0,14m, altura de montagem 11 metros;
- Resistividade do solo 600 Ω/m;

Nesta seção os cálculos não serão desenvolvidos passo a passo para a “*configuração 8*”, dos trechos de rede aérea compacta. Como já anteriormente citado, os condutores que equipados da cobertura em XLPE (polietileno reticulado) apesar de seu revestimento, não podem ser considerados isolados. Isso se dá pelo fato de que a camada única de XLPE não é suficiente para que o campo elétrico permaneça confinado no dielétrico da isolação do cabo. Deste modo, todos os cálculos realizados anteriormente para a “*configuração 1*”, na qual se emprega condutores de alumínio com alma de aço nus, são válidos também para as configurações 8 e 9, que empregam cabos com essa cobertura. Os cálculos não serão repetidos nessa seção, sendo que os parâmetros obtidos para todas as configurações se encontram em tabela no Apêndice A.

Os cálculos apresentados na seção 4.3.4 apresentam as constantes quilométricas para uma das nove diferentes configurações existentes neste alimentador em específico. A elaboração de *scripts* no MATLAB se fez necessária para facilitar a obtenção das constantes para todas as configurações, totalizando 7 configurações de rede aérea com cabos nus e 2 configurações de rede aérea compacta. Deste modo, uma simples alteração nos dados de entrada, como dados estruturais do condutor empregado e espaçamento das fases na cruzeta, por exemplo, gera como resultado as constantes quilométricas da linha para a configuração pretendida.

5. O software OpenDSS

Este capítulo tem a intenção de apresentar uma visão geral das funções básicas do *software* a ser utilizado neste trabalho. A caracterização dos elementos neste texto embasa as funcionalidades utilizadas na modelagem do alimentador da CPFL, sendo que transformadores de distribuição presentes no sistema não foram modelados já que foram fornecidas as curvas de carga agregadas do alimentador. Vale ressaltar que não todas funcionalidades do *software* OpenDSS serão abordadas neste texto, podendo ser consultadas para futuros trabalhos no manual elaborado pelo *Electric Power Research Institute* (Dugan, 2016).

5.1. Breve História do software OpenDSS

O *software* Open DSS é uma ferramenta de simulação de propósitos gerais que possui características especiais para a criação de modelos de sistemas de distribuição de energia elétrica e realização de diversos tipos de análises relacionadas ao planejamento da distribuição e qualidade de energia. Apesar de ser amplamente utilizado para a solução do problema de fluxo de carga, ou ainda análises estáticas de sistemas, a ferramenta segue mais a linha de programas utilizados para análise de fluxo de harmônicos ou até mesmo análises dinâmicas. Essa característica garante à ferramenta uma maior flexibilidade de modelagem em se tratando da acomodação de variados modelos de carga e configurações de circuitos não-usuais.

A sigla DSS vem do nome em inglês *Distribution System Simulator*, que começou a ser desenvolvido em 1997 na empresa Eletrotek Concepts, Inc., por Roger Dugan e Tom MacDermott. Em 2004, o software DSS foi comprado pelo Electric Power Research Institute (EPRI), e posteriormente apresentado sob licença de código aberto: o *software* Open DSS. Segundo os desenvolvedores, os principais motivos para o início do desenvolvimento deste software foram a necessidade de um programa capaz de dar apoio a estudos de redes de distribuição, com a presença de geração distribuída; aliada aos interesses de criação de uma ferramenta flexível e poderosa para análises e estudos de ponta em sistemas de distribuição, objetivando criar soluções para novos desafios relativos a tais sistemas.

O *software* é baseado em linhas de comando que caracterizam os modelos de circuitos a serem simulados, podendo ser implementadas diretamente no executável do programa, ou ainda lidas de arquivos de texto fixo ou programas externos. Além disso, por dispor da interface COM (*Component Object Model*) da *Microsoft*, permite que o usuário programe e execute modos de solução customizados, em adição àqueles modos já embutidos pelos desenvolvedores. Desta forma, o DSS pode ser controlado por linguagens como MATLAB, Python, C#, entre outras que suportem a

interface COM, em destaque o VBA (*Visual Basics for Applications*). Tudo isso proporciona uma robustez analítica para solução de problemas específicos, bem como capacidades gráficas para a apresentação de resultados.

5.2. Modelos Básicos

5.2.1. Barras

As barras no *software* OpenDSS são elementos de circuito que servem como ponto de conexão para todos os outros elementos de um modelo. Estas contém $[1...N]$ nós que representam as fases da barra e conexões do neutro. As tensões são a principal propriedade da barra sendo apresentadas em relação ao nó referência (Nó 0) que não necessariamente é o nó terra do circuito.

Vale ressaltar que no OpenDSS as barras são definidas como consequência da inserção de novos elementos, e não definidas previamente como usual.



Figura 26 - Elemento barra no *software* OpenDSS.

5.2.2. Terminal

Cada elemento elétrico do sistema possui um ou mais terminais, nos quais estão conectados um ou mais condutores. Os condutores são numerados $[1,2,3..N]$.

Se o terminal encontra-se conectado em um dispositivo de N fases, os primeiros N condutores são considerados os condutores fase, na sequência em que aparecem. O restante dos condutores neutros ou não eletrificados. A Figura 27 expõe um elemento que possui um terminal com N conectores.

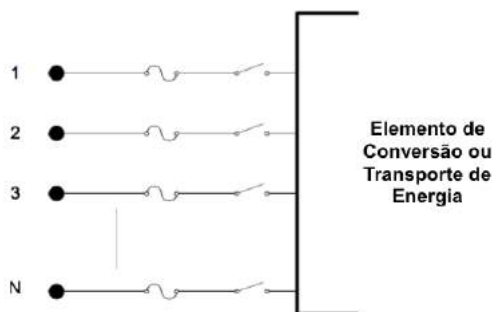


Figura 27 - Elemento terminal com N conectores. (Dugan, 2016)

5.2.3. Elementos de Transporte de Energia

Os elementos de transporte de energia tem a característica de possuir dois ou mais terminais polifásicos, desempenhando a função de transportar energia de um ponto a outro. Exceção à regra são os reatores e bancos de capacitores, que mesmo assim são considerados elementos de transporte e caracterizados basicamente por suas matrizes de admitâncias nodais.

Alguns exemplos que podem ser colocados são:

- Uma linha trifásica a quatro fios que apresenta dois terminais com 4 condutores cada;
- Um transformador monofásico de três enrolamentos, que possui 3 terminais com 2 condutores cada.

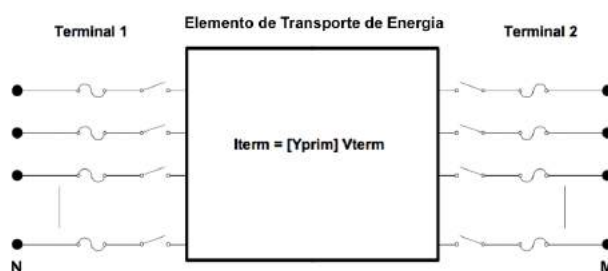


Figura 28 - Elemento de transporte de energia com dois terminais, o primeiro com N terminais e o segundo com M terminais. (Fonte: Dugan, 2016)

5.2.4. Elementos de Conversão de Energia

Os elementos conversores de energia realizam a conversão de energia elétrica para alguma outra forma de energia, ou o inverso. Podem armazenar temporariamente a energia para posteriormente devolvê-la, como é no caso de elementos reativos.

A maior parte deles apresenta apenas uma conexão com o sistema de potência, ou seja, somente um terminal multifásico. Como exemplos podem ser citados os geradores, acumuladores de energia, cargas, equivalentes de Thévenin, e outros.

A descrição desses elementos no *software* pode ser feita por uma matriz de impedâncias nodais que abrange a parcela linear e/ou uma série de equações diferenciais complexas que contemplam uma equação de injeção ou compensação de corrente, que não serão abordadas em maiores detalhes no presente trabalho.

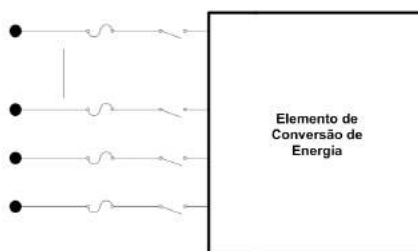


Figura 29 - Elemento de conversão de energia. (Fonte: Dugan, 2016)

5.3. Elementos básicos

Nesta seção, são apresentados alguns elementos básicos para a modelagem e simulação de um sistema de distribuição no OpenDSS. Adicionalmente são expostas as linhas de comando utilizadas na caracterização dos mesmos, na linguagem de programação do *software*. É importante evidenciar que o modelo matemático para a construção das matrizes de admitâncias desses elementos não é tema abordado nesta seção, podendo ser consultado no Capítulo 3.

5.3.1. Equivalente de Thévenin

O equivalente de Thévenin pode ser usado na representação da barra referência ou *swing* nos cálculos de fluxo de carga no modelo do sistema elétrico do *software* Open DSS. Este equivalente pode ser definido como uma representação da transmissão vista da subestação, uma subestação vista por um alimentador ou algum outro tipo de equivalente.

No *software*, o elemento que foi denominado *Circuit* deve ser utilizado para a inicialização de qualquer circuito a ser modelado, sendo este um elemento de conversão de energia que possui apenas um terminal.

Alguns parâmetros que devem ser utilizados para definição do elemento *Circuit* estão apresentados na Tabela 02.

Tabela 02 - Principais parâmetros do elemento *Circuit*.

Código do Parâmetro	Descrição
<i>basekV</i>	Tensão de linha nominal em kV
<i>Bus1</i>	Nome da barra à qual o terminal do equivalente está conectado
<i>R1</i>	Resistência de sequência positiva da fonte em Ω
<i>X1</i>	Reatância de sequência positiva da fonte em Ω
<i>Mvasc3</i>	Potência de curto circuito trifásica em MVA
<i>Mvasc1</i>	Potência de curto circuito monofásica em MVA
<i>pu</i>	Valor por unidade da tensão na barra

A caracterização do elemento deve ser feita fornecendo o par *R1* e *X1* ou *Mvasc3* e *Mvasc1*. Nas linhas abaixo são apresentados exemplos dos códigos em OpenDSS para a definição do elemento *Circuit*.

- Exemplo 1: equivalente de Thévenin conectado a barra denominada “BarraSwing” de 13,8 kV com tensão de 1 pu, potência de curto circuito trifásica 2000 MVA e potência de curto circuito monofásica 2000 MVA.

```
New Circuit.Subestação1 bus1=BarraSwing1 basekv=13.8 pu=1.00  
~mvasc3=2000.0 mvasc1=2000.0
```

Obs.: Fornecendo valores elevados para as potências de curto circuito pode-se caracterizar um barramento infinito, de modo a obter a tensão nominal na barra de referência.

- Exemplo 2: equivalente de Thévenin conectado a barra denominada “BarraSwing” de 13,8 kV com tensão de 1 pu e reatância de sequência positiva 0,0002 pu.

*New Circuit.Subestação2 bus1=BarraSwing2 basekv=13.8 pu=1.00
~r1=0 x1=0.002*

5.3.2. Linha

As linhas são elementos que fornecem energia. No *software* OpenDSS esse elemento apresenta dois terminais polifásicos que utilizam o modelo π , com os capacitores *shunt*, na sua modelagem.

De maneira simplificada as linhas podem ser caracterizadas por suas impedâncias, sendo necessária assim a determinação de sua matriz de admitâncias nodais. As impedâncias podem ser especificadas em termos de componentes simétricas ou ainda em termos de suas componentes de fase. Pode-se ainda determinar todas as características de uma configuração de linha através de um elemento geral do OpenDSS intitulado *LineCode*.

O *LineCode*

O elemento geral *LineCode* se mostra muito útil para o armazenamento de características de todas as configurações (ou arranjos) de linhas utilizadas no circuito. Deste modo, ao definir uma linha do sistema de distribuição deve-se informar qual a configuração utilizada naquele trecho, por meio do *LineCode*.

Essa convenção se mostra uma boa prática na programação do circuito no OpenDSS uma vez que, em geral o sistema de distribuição é composto por conjuntos de linhas que apresentam as mesmas características.

Os parâmetros principais na definição do elemento *LineCode* estão descritos na Tabela 03.

Tabela 03 - Principais parâmetros do elemento *LineCode*.

Código do Parâmetro	Descrição
<i>N phases</i>	Número de fases
<i>BaseFreq</i>	Frequência base das reatâncias
<i>R1</i>	Resistência de sequência positiva da fonte em Ω por unid. de distância
<i>X1</i>	Reatância de sequência positiva da fonte em Ω por unid. de distância
<i>R0</i>	Resistência de sequência zero da fonte em Ω por unid. de distância
<i>X0</i>	Reatância de sequência zero da fonte em Ω por unid. de distância
<i>C1</i>	Capacitância total de sequência positiva em ηF por unid. de distância

<i>C0</i>	Capacitância total de sequência zero em ηF por unid. de distância
<i>Units</i>	Unidades de distância
<i>NormAmps</i>	Corrente nominal da linha
<i>Rmatrix</i>	Matriz de resistências da linha por unidade de distância
<i>Xmatrix</i>	Matriz de reatâncias da linha por unidade de distância
<i>Cmatrix</i>	Matriz de capacitâncias da linha por unidade de distância

Configuração de uma linha trifásica a 3 fios

```
New Linecode.Config1 nphases=3 basefreq=60 units=km
~normamps=420.0
~ rmatrix =[0.659 | 0.058 0.659 | 0.058 0.058 0.659]
~xmatrix = [1.075 | 0.564 1.075 | 0.533 0.616 1.075]
~cmatrix = [7.816 | -2.062 8.716 | -1.402 -3.089 8.423]
```

Configuração de uma linha trifásica a 3 fios (componentes simétricas)

```
New Linecode.Config2 nphases=3 basefreq=60 units=km
~normamps=420.0
~ R1 = 0.6011
~ X1 = 0.5045
~ R0 = 0.7767
~ X0 = 2.2738
```

Definidas as configurações de linhas recorrentes do sistema em processo de modelagem, pode-se caracterizar o trecho de linha com as informações de conexão entre barras, comprimento do trecho e o *Linecode* propriamente dito. A Tabela 04 apresenta quais são os parâmetros básicos do elemento *Line*.

Tabela 04 - Principais parâmetros do elemento *Line*.

Código do Parâmetro	Descrição
<i>phases</i>	Número de fases
<i>Bus1</i>	Nome da barra onde o terminal 1 está conectado
<i>Bus2</i>	Nome da barra onde o terminal 2 está conectado
<i>LineCode</i>	Informação da configuração utilizada no trecho de linha
<i>length</i>	Comprimento do trecho de linha

A seguir é apresentado um exemplo do código em OpenDSS com o intuito de esclarecer a utilização e link entre os elementos *Line* e *LineCode*.

Linha trifásica a 3 fios

```
New line.Linha_1 phases=3 bus1=Barra27 bus2=Barra29 length=0.0216 units=km
~linecode=Config_1
```

5.3.3. Carga

As cargas são elementos de conversão de energia de único terminal e constituem parte importante de muitas análises de sistemas de potência. No OpenDSS a carga deve ser caracterizada pelos valores dos seguintes pares:

- potência ativa nominal em kW e fator de potência FP;
- potência ativa nominal em kW e potência nominal em *kVAr*;
- potência aparente nominal em kVA e fator de potência FP.

Além disso, as cargas são modeladas conforme os modelos apresentados na Tabela 05. Os conceitos de modelos de carga não serão abordados nesta seção, sendo que o modelo utilizado para fins de simulação neste trabalho é o modelo padrão, de potências ativa e reativa (P e Q) constantes.

Tabela 05 - Modelos de carga do OpenDSS.

Modelo	Descrição
1	Potências ativa e reativa constantes (P e Q)
2	Impedância constante (Z)
3	Potência ativa constante e potência reativa quadrática (motor)
4	Potência ativa não linear e potência reativa quadrática
5	Corrente constante
6	Especial ZIP

A Tabela 06 mostra os principais parâmetros a serem definidos na caracterização do elemento *Load*. Quando caracterizadas, as cargas são assumidas como balanceadas para o número de fases especificadas. No entanto, é possível modelar cargas desbalanceadas fazendo a colocação de cargas monofásicas para cada uma das fases.

Tabela 06 - Principais parâmetros do elemento *Load*.

Parâmetro	Descrição
<i>phases</i>	Número de fases
<i>Bus1</i>	Nome da barra onde a carga é conectada
<i>kV</i>	Tensão nominal
<i>kVA</i>	Potência aparente nominal
<i>kW</i>	Potência ativa nominal
<i>kvar</i>	Potência reativa nominal
<i>FP</i>	Fator de potência
<i>Daily</i>	Nome da curva diária (<i>loadshape</i>) associada

Seguem alguns exemplos de linhas de código em OpenDSS para descrição de possíveis configurações de cargas.

Carga trifásica equilibrada em estrela isolada

```
New load.carga101 phases=3 model=1 bus=Barra29.1.2.3.4
~kV=0.4 kW=30 kVAr=20 conn=wye
```

Carga trifásica desequilibrada em estrela aterrada

```
New load.carga101_1 phases=1 model=1 bus=Barra29 kV=0.4 kW=30 kVAr=20
~conn=wye
New load.carga101_2 phases=1 model=1 bus=Barra29 kV=0.4 kW=18 kVAr=12
~conn=wye
New load.carga101_3 phases=1 model=1 bus=Barra29 kV=0.4 kW=35 kVAr=22
~conn=wye
```

Carga trifásica bifásica AB

```
New load.carga101 phases=2 model=5 bus=Barra29.1.2
~kV=0.4 kW=30 kVAr=20 conn=wye
```

5.3.4. Curva de Carga

O elemento geral *LoadShape* trata da definição das curvas de carga no *software*, sendo muito importante para as soluções sequenciais de fluxo de potência, nos modos diário ou anual. Tal elemento consiste de uma série de multiplicadores, que normalmente variam de 0.0 à 1.0, aplicados à potência

kW da carga, representando a variação da carga em um certo período de tempo. A Tabela 07 apresenta os principais parâmetros para caracterização do elemento *Loadshape*.

Tabela 07 - Principais parâmetros do elemento *Loadshape*.

Parâmetro	Descrição
<i>npts</i>	Número de pontos esperados na curva de carga
<i>Interval</i>	Intervalos de tempo entre os pontos da curva de carga em horas
<i>Mult</i>	Vetor com os multiplicadores dos valores de carga em <i>pu</i> (ativa)
<i>Qmult</i>	Vetor com os multiplicadores dos valores de carga em <i>pu</i> (reativa)

Deve-se atentar ao fato de que por meio da utilização do comando “*UseActual = Yes*” nas propriedades do *LoadShape*, o usuário deixa de usar os valores inseridos como multiplicadores, passando a usá-los como os próprios valores de potência ativa (*kW*) e reativa (*kVAr*).

Os exemplos a seguir exibem linhas de código em OpenDSS para caracterização de uma curvas de carga:

```
New Loadshape.200_1 npts=24 interval=1
~mult = (0.57 0.75 1.04 1.00 1.26 0.69 0.64 0.56 0.70 1.00 1.02 0.98 1.01 0.88 0.76 0.75 0.98
1.04 1.24 1.47 1.80 1.58 1.16 0.99)
```

```
New Loadshape.300_1 npts=24 interval=1
~mult = (45.49 43.24 44.59 44.83 42.10 41.15 40.78 41.75 44.66
50.77 45.27 48.35 45.96 46.47 49.52 53.32 53.83 50.37 39.11
42.26 49.72 50.54 50.51 59.73) Useactual=Yes
```

5.4. Modos de Simulação

A última versão do *software* OpenDSS possui os mais diversos recursos para simulação de circuitos, possuindo ferramentas para solução do fluxo de potência, análises de curto-circuito, fluxo de harmônicos, estudos em estabilidade e crescimento da demanda. O presente trabalho enfoca a análise estática de redes de distribuição de energia elétrica, mais especificamente o cálculo do fluxo de potência. A subseção 5.4.1 apresenta as principais características dessa ferramenta, seguida da seção 5.4.2 que traz as linhas de código em OpenDSS para a seleção de cada modo de solução.

5.4.1. O Fluxo de Potência

Como comentado anteriormente, o problema do fluxo de potência é provavelmente o mais solucionado fazendo uso do software OpenDSS, mesmo que este tenha sido inicialmente desenvolvido como uma ferramenta de análise de harmônicos para sistemas de potência. Assim, o programa acaba funcionando de modo diferente da maioria das ferramentas computacionais utilizados para análise estática desses sistemas. Uma diferença interessante é que, dado à robustez de suas ferramentas, o *software* se mostra capaz de resolver circuitos de configuração mais complexa (radiais com socorro, *network*) com a mesma facilidade que apresenta a solução de circuitos radiais. O OpenDSS pode ainda ser utilizado para análise estática de redes de transmissão de pequeno a médio porte, apresentando portanto a opção de se empregar um modelo completo multifásico (o padrão do *software*), ou um modelo simplificado de sequência positiva (Dugan, 2016).

O fluxo de potência pode ser executado em diferentes modos de solução, incluindo: (i) o modo padrão de simulação para um instante operacional, o modo *snapshot*; (ii) o modo diário ou anual; (iii) o modo Monte Carlo; (iv) e finalmente modos que permitem que a carga varie em função do tempo. Tais modos de solução são embasados nos algoritmos de *injeção de corrente* ou de *Newton*, empregados pelo *software*.

Uma vez resolvido o fluxo de potência de um dado circuito, as perdas, tensões nodais, potência e outras informações são disponibilizadas para o usuário, podendo ser apresentadas de forma generalizada para todo o circuito, para cada componente ou para áreas previamente definidas.

O modo padrão *Snapshot* realiza o cálculo de fluxo de potência para uma condição de carregamento em específico. Desta forma, normalmente se utiliza este modo para estudos nos quais se deseja conhecer condições limites do circuito, ou seja, nos instantes de máxima e mínima demanda de energia.

O modo diário, por sua vez, realiza o cálculo de fluxo de potência 24 vezes, correspondentes à condição de carregamento do circuito a cada hora do dia. No entanto, permite que o dia seja ainda discretizado em minutos ou segundos, permitindo assim análises mais refinadas. Os períodos de simulação de 24 horas, um mês ou um ano são geralmente utilizados em análises de planejamento de redes de distribuição.

Além do modo diário, dispõe-se também do modo anual, o qual permite o cálculo de 8760 condições do circuito. Finalmente, o modo *Dutycycle* permite que o usuário selecione o período de tempo que se deseja analisar, e em quantas vezes o período deve ser particionado (Dugan, 2016; Freitas, 2015).

5.4.2. Linhas de comando no OpenDSS

Esta seção apresenta os principais comandos necessários para a solução do fluxo de potência nos modos padrão *Snapshot* e diário. Vale ressaltar que somente os modos de simulação aplicados no desenvolvimento deste trabalho serão apresentados.

Para se iniciar a simulação é necessário que as bases de tensão do circuito sejam estabelecidas no *software*. Para isso o comando “*set voltage bases = [13.8]*” deve ser inserido, possibilitando assim que os resultados sejam apresentados também em p.u. (Freitas, 2015).

Os modos de simulação podem ser inseridos na programação do circuito a partir das seguintes linhas de comando:

Modo padrão *Snapshot*

```
Set mode = snapshot  
Solve
```

As linhas de código no modo diário contam com os comandos *stepsize* e *number*, que permitem alterar a base de tempo em que se deseja trabalhar, seja em segundos, minutos ou horas.

Modo diário

```
Set controlmode = static  
Set mode = daily stepsize = 1.0h number = 24  
Solve
```

6. Modelos de Alimentadores no OpenDSS

O presente capítulo apresenta a simulação, no *software* OpenDSS, da rede teste do IEEE de 13 barras, com o intuito de destacar algumas particularidades da sua implementação e posteriormente realizar o fluxo de potência para uma condição de carregamento específica. Posteriormente será apresentada a análise estática do alimentador real da CPFL Paulista, também obtida através da simulação via *software*.

6.1. Rede teste IEEE 13 barras

Os sistemas teste do IEEE foram criados em 1992 com o propósito de fornecer aos desenvolvedores de *software*, maneiras de avaliar algoritmos utilizados na solução de sistemas radiais trifásicos desbalanceados. Estes circuitos representam, em menor escala, circuitos de alimentadores reais de distribuição.

O sistema teste do IEEE 13 barras é pequeno e opera em tensão de 4.16 kV. Geralmente utilizado para testar ferramentas e funcionalidades de softwares de análise de sistemas de distribuição de energia elétrica, fornecendo um teste válido para as principais análises realizadas neste sistemas. Este alimentador é relativamente carregado, e conta com um regulador de tensão na subestação, linhas de distribuição aéreas e subterrâneas, com ramais monofásicos e trifásicos, um banco de capacitores, um transformador de linha, e suas cargas são desbalanceadas. Nesta seção são apresentados alguns detalhes da modelagem desta rede no OpenDSS, seguidos da solução do fluxo de potência para o alimentador. A Figura 30 apresenta o diagrama unifilar dessa rede. Os dados e parâmetros elétricos da mesma não serão apresentados, podendo ser obtidos na página online *IEEE Distribution Test Feeders* (IEEE, 2010).

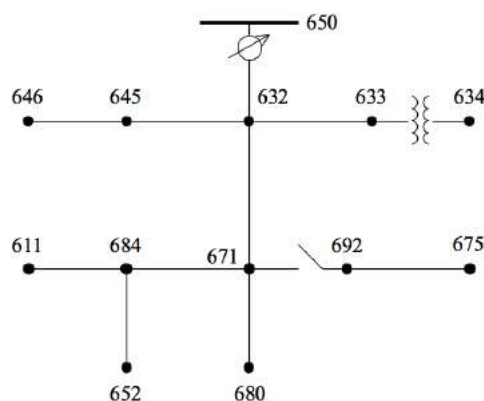


Figura 30 - Diagrama unifilar da rede teste IEEE 13 barras (IEEE, 2010).

A respeito das linhas de distribuição em circuitos de distribuição, são modeladas a partir da obtenção dos parâmetros de impedâncias série e admitâncias shunt, segundo formulação matemática apresentados nos Capítulos 3 e, no OpenDSS, conforme texto do Capítulo 5.

Os bancos de capacitores são modelados conforme sua capacidade nominal e tensão nominal. É necessário apresentar o número de fases, e a barra no qual um dos terminais está conectado (caso *shunt*). A Tabela 08 apresenta esses dados, seguida das linhas de comando no OpenDSS para a modelagem desse bancos de capacitores.

Tabela 08 - Capacitores da rede teste do IEEE 13 barras

Barra	Fase A kVAr	Fase B kVAr	Fase C kVAr
675	200	200	200
611	-	-	100

Capacitor *shunt* de 4,16 kV e 3 kVAr conectado à barra 675

```
New Capacitor.Cap1 Bus1=675 phases=3 kVAR=600 kV=4.16
```

Para a caracterização de transformadores, geralmente é necessário que se defina: a quantidade e tipo de conexão (estrela ou triângulo) dos enrolamentos, o número de fases, as barras nas quais os seus terminais estão conectados, a potência nominal em kVA e seus elementos seus elementos elétricos que caracterizam o circuito equivalente (resistência série dos enrolamentos, reatância de dispersão). A Tabela 09 apresenta as características do transformador da rede teste do IEEE, seguida das linhas de comando que o caracterizam no OpenDSS.

Tabela 09 - Transformador da rede teste IEEE 13 barras

Transformador	kVA	kV primário	kV secundário	r (%)	x (%)
XFM -1	500	4.16 Estrela Aterrada	0.48 Estrela Aterrada	1.1	2

Transformador trifásico estrela-estrela

```
New Transformer.XFM1 Phases=3 Windings=2 XHL=2
~ wdg=1 bus=633 conn=Wye kv=4.16 kva=500 %r=.55 XHT=1
~ wdg=2 bus=634 conn=Wye kv=0.480 kva=500 %r=.55 XLT=1
```

O regulador de tensão é um elemento de controle definido pelo comando *RegControl*, e possui a função de controlar e monitorar a tensão no enrolamento do transformador ao qual foi associado.

Além disso, o regulador desempenha a função de compensação da queda de tensão na linha. O controle de tensão se dá via alteração do *tap* do transformador. Para a caracterização deste elemento no OpenDSS devem ser passados, além de impedância, tipo de conexão e tensão nominal, alguns parâmetros de controle do *tap*: qual transformador é controlado, qual enrolamento, a relação de transformação do mesmo, a tensão de referencia, e a banda de variação de tensão em torno da referência. A Tabela 10 apresenta as características do regulador.

Tabela 10 - Regulador da rede teste IEEE 13 barras

Regulador ID:	1		
Ramo de instalação	650 - 632		
Localização	50		
Sequência de fases	A - B -C		
Conexão	Estrela Aterrada		
Fases monitoradas	A-B-C		
Largura de Banda	2.0 volts		
Relação TP	20		
Relação CT	700		
Ajustes do compensador	Fase A	Fase B	Fase C
R (p.u.)	3	3	3
X (p.u.)	9	9	9
Nível de tensão (V)	122	122	122

Transformador trifásico com regulador no secundário

```

New Transformer.Reg1 phases=1 XHL=0.01 kVAs=[1666 1666]
~ Buses=[650.1 RG60.1] kVs=[2.4 2.4] %LoadLoss=0.01
new regcontrol.Reg1 transformer=Reg1 winding=2 vreg=122 band=2 ptratio=20 ctprim=700 R=3 X=9
New Transformer.Reg2 phases=1 XHL=0.01 kVAs=[1666 1666]
~ Buses=[650.2 RG60.2] kVs=[2.4 2.4] %LoadLoss=0.01
new regcontrol.Reg2 transformer=Reg2 winding=2 vreg=122 band=2 ptratio=20 ctprim=700 R=3 X=9
New Transformer.Reg3 phases=1 XHL=0.01 kVAs=[1666 1666]
~ Buses=[650.3 RG60.3] kVs=[2.4 2.4] %LoadLoss=0.01
new regcontrol.Reg3 transformer=Reg3 winding=2 vreg=122 band=2 ptratio=20 ctprim=700 R=3 X=9

```

As cargas são modeladas basicamente a partir dos valores de demanda de potência ativa e reativa em cada fase, a conexão (delta ou estrela) e o modelo dependente de tensão (potência constante, corrente constante ou impedância constante), como apresentados nos Capítulos 5. A única

exceção é o modelo para cargas distribuídas uniformemente ao longo de uma linha, como as apresentadas na Tabela. Este tipo de carga é modelado através da criação de uma barra fictícia entre os terminais desta linha que concentra toda a carga. A barra fictícia pode ser modelada na metade da linha ou a um terço do seu terminal, conforme apresentado em Kagan (2005).

Tabela 11 - Carga distribuída da rede teste IEEE 13 barras.

Barra DE	Barra PARA	Carga	Fase A		Fase B		Fase C	
			kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
632	671	Y-PQ	17	10	66	38	117	68

Carga distribuída monofásica

```
New Line.632670 Phases=3 Bus1=632.1.2.3 Bus2=670.1.2.3 LineCode=mtx601 Length=667 units=ft
New Line.670671 Phases=3 Bus1=670.1.2.3 Bus2=671.1.2.3 LineCode=mtx601 Length=1333 units=ft
New Load.670a Bus1=670.1 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=17 kvar=10
New Load.670b Bus1=670.2 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=66 kvar=38
New Load.670c Bus1=670.3 Phases=1 Conn=Wye Model=1 kV=2.4 kW=117 kvar=68
```

Calculado o fluxo de potência para o sistema teste do IEEE 13 barras obteve-se a solução indicada na Tabela 12, onde se destacam as magnitudes e ângulos de fase das tensões nodais para cada barra e respectivas fases. O perfil de tensões desta rede é apresentado na Figura 31, de modo que em preto tem-se a tensão na fase a, em vermelho na fase b e finalmente em azul na fase c, sendo os limites operacionais destacados em laranja. O número de iterações que o *software* utilizou neste cálculo foi de 11.

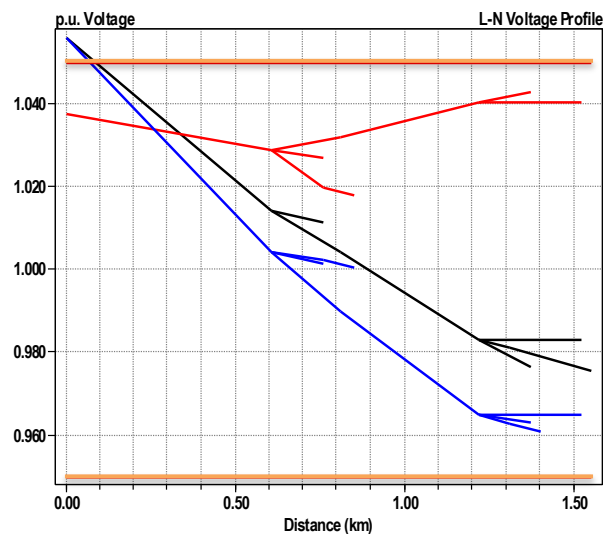


Figura 31 - Perfil de tensões ao longo da rede teste do IEEE 13 Barras.

Tabela 12 - Tensão e ângulos nodais para cada barra da rede teste IEEE 13 barras

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)
SOURCEBUS	1,0000	30,0	1,0000	-90,0	1,0000	150,0
650	0,9999	0,0	1,0000	-120,0	0,9999	120,0
RG60	1,0560	0,0	1,0374	-120,0	1,0560	120,0
633	1,0113	-2,6	1,0270	-121,8	1,0015	117,8
634	0,9872	-3,3	1,0084	-122,3	0,9824	117,3
671	0,9828	-5,4	1,0403	-122,4	0,9649	116,0
645	-	-	1,0197	-121,9	1,0023	117,8
646	-	-	1,0180	-122,0	1,0002	117,8
692	0,9828	-5,4	1,0403	-122,4	0,9649	116,0
675	0,9763	-5,6	1,0426	-122,6	0,9629	116,0
611	-	-	-	-	0,9608	115,7
652	0,9753	-5,3	-	-	-	-
670	1,0040	-3,5	1,0319	-122,0	0,9897	117,1
632	1,0143	-2,5	1,0289	-121,8	1,0042	117,8
680	0,9828	-5,4	1,0403	-122,4	0,9649	116,0
684	0,9809	-5,4	-	-	0,9628	115,9

A Tabela 13 apresenta as tensões mínimas e máximas para cada fase do alimentador. Nota-se que não há violação de tensão mínima, considerando o limite mínimo de 0,95 p.u.. Porém, para o limite máximo de 1,05 p.u houve violação, mas esta violação ocorreu somente na barra do secundário do regulador de tensão, ou seja não houveram violações de tensão nas barras das cargas. Deste modo, a sobretensão observada não se apresenta como um problema para a qualidade de energia do sistema de distribuição.

Tabela 13 - Tensões máximas e mínimas por fase da rede teste do IEEE.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão Mínima (p.u.)	0,9753	1,0000	0,9608
Tensão Máxima (p.u.)	1,0560	1,0426	1,0560

A Tabela 14 apresenta as tensões de sequência e o fator de desbalanço de tensão (relação entre tensão de sequência negativa e positiva) para cada barra. Nota-se que a tensão de sequência positiva mantém-se entre os limites de tensão adequados. Neste caso, ressalta-se a importância de se utilizar modelos trifásicos para alimentadores de distribuição, uma vez que as violações nos limites de tensão citadas nas tabelas anteriores (fase a e fase c) não são observadas utilizando somente o modelo de sequência positiva. Outro ponto é que o fator de desbalanço de tensão também apresenta um valor adequado, geralmente as normas estabelecem um limite máximo de 2% (ANEEL, 2016b).

Tabela 14 - Tensões de sequencia em p.u. e fator de desbalanço de tensão.

Barra	Sequência Zero (p.u)	Sequência Positiva (p.u)	Sequência Negativa (p.u)	Desbalanço de Tensão (%)
SOURCEBUS	0,0000	1,0000	0,0146	0,00
650	0,0036	0,9999	0,0193	0,00
RG60	3,5990	1,0498	3,5816	0,59
633	6,2405	1,0133	2,9536	0,50
634	6,9233	0,9927	3,4142	0,60
671	19,8558	0,9958	10,1479	1,77
645	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
646	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
692	19,8558	0,9958	10,1479	1,77
675	21,0794	0,9937	10,9093	1,90
611	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
652	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
670	10,5904	1,0085	5,3816	0,92
632	6,0308	1,0158	2,9472	0,50
680	19,8558	0,9958	10,1479	1,77
684	0,0000	0,0000	0,0000	0,00

Outro ponto referente à análise de tensão deste alimentador é a presença de um regulador de tensão. No caso, foi escolhido que o *software* OpenDSS calculasse os valores de *tap* em sua solução. A Tabela apresenta os valores calculados para o regulador de tensão. Caso opte-se por manter constantes os valores de *tap* deve-se incluir a seguinte linha de comando no OpenDSS: “*Set Controlmode=OFF*”.

Tabela 15 - Posições de *tap* calculadas pelo OpenDSS

Fase	Min	Max	Posição
Fase A	-16	16	9
Fase B	-16	16	6
Fase C	-16	16	9

Quanto à demanda de potência ativa e reativa do alimentador, a Tabela 16 apresenta a demanda total calculada pelo fluxo de potência do OpenDSS para cada fase. Nota-se pelo fator de potência que as fases A e C apresentam um fator de potência menor que 0,92, valor mínimo geralmente aceitado. Porém, utilizando a potência trifásica nota-se um fator de potência também abaixo do limite. Caso fosse necessário dimensionar um banco de capacitores para correção do fator de potência, utilizando o modelo de sequencia positiva (ou circuito equivalente monofásico) não seria possível corrigir adequadamente as fases A e C, mais uma vez evidenciando a importância dos modelos trifásicos para sistemas de distribuição, de forma análoga ao caso da tensão de sequencia positiva indicado anteriormente.

Tabela 16 - Demanda de potência ativa e reativa total para a rede teste do IEEE.

	Fase A	Fase B	Fase C	Trifásica
Potência Ativa Total (kW)	1024,13	1242,25	1300,85	3567,23
Potência Reativa Total (kVAr)	612,77	419,10	704,75	1736,61
Fator de Potência	0,86	0,95	0,88	0,90

Finalmente outro resultado de interesse do cálculo do fluxo de potência são as perdas totais do alimentador. Para o alimentador IEEE 13 barras obteve-se um valor de 112,41 kW de perdas totais, o que representa 3,151% da demanda total do alimentador. A seção a seguir apresenta os resultados obtidos no cálculo de fluxo de potência para o alimentador da CPFL.

6.2. Análise Estática do Alimentador da CPFL

6.2.1. Modelagem OpenDSS

A modelagem do alimentador da CPFL no *software* OpenDSS se deu após o levantamento das características do mesmo e posterior cálculo das constantes quilométricas, ou parâmetros série e shunt das linhas da rede de distribuição primária de energia elétrica, conforme procedimento descrito no Capítulo 4. Tais informações foram condensadas em tabelas no Apêndice A, onde são apresentados todos os trechos de linha do circuito com suas respectivas barras de origem e destino, comprimento, e configuração, parâmetros necessários para a programação dos elementos *Line* no software. Ainda neste apêndice são exibidas as matrizes de impedância e admitância da rede completa, em termos das componentes de fase, para cada uma das nove configurações identificadas no alimentador, previamente apresentadas no Capítulo 4. Estes parâmetros, por sua vez, são utilizados na programação dos elementos *LineCode* do OpenDSS. A Figura 32 apresenta o grafo da topologia do alimentador, que possui 132 barras e 131 ramos (trechos de circuitos da rede aérea).

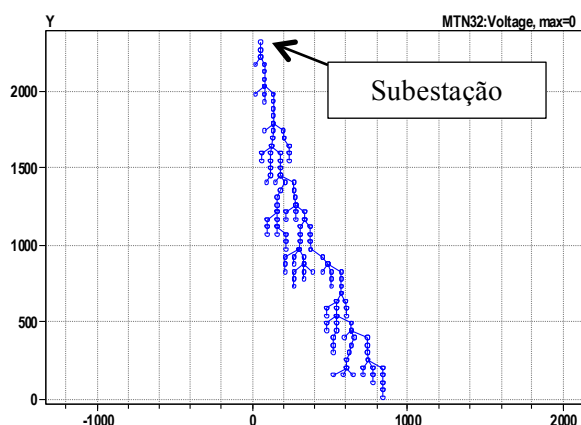


Figura 32 - Grafo da topologia do alimentador da de 132 barras da CPFL.

As cargas correspondem aos transformadores de distribuição que alimentam a rede secundária e foram modeladas conforme os dados disponibilizados pela CPFL. No caso, este alimentador possui 92 transformadores de distribuição responsáveis pelo fornecimento de energia para 2664 consumidores. As demandas de potência ativa e reativa foram disponibilizadas através das curvas de carga agregadas para cada um dos transformadores, individualmente para cada fase, fazendo uso do modelo de carga PQ (potências ativa e reativa) constante, dado o fato de as cargas serem desbalanceadas. Detalhes de uma metodologia para obtenção das curvas de carga agregadas podem ser obtidas em Massignan (2016). Essas curvas de demanda ativa e reativa foram modeladas de acordo com o elemento *Loadshape* do OpenDSS. As Figuras 31, 32 e 33, apresentam um exemplo de curva de carga retirado do *software* ao longo de um dia, em intervalos de 15 minutos (96 valores de demanda ativa e reativa), para cada uma das fases a, b e c. Em azul é apresentada a curva de carga agregada para a demanda de potência ativa e em verde a curva de carga agregada para a demanda de potência reativa.

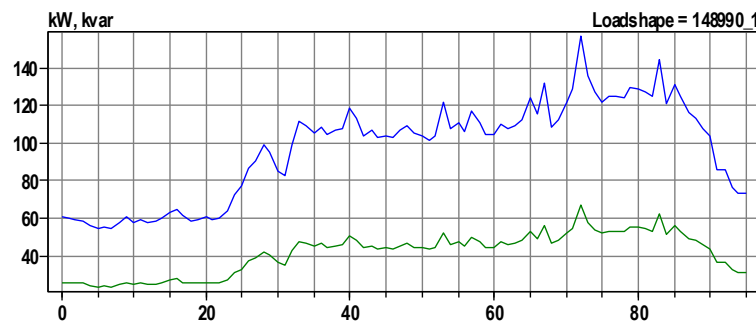


Figura 33 - Curvas de carga agregadas para potência ativa e reativa ao longo de um dia (96 pontos) – Fase a

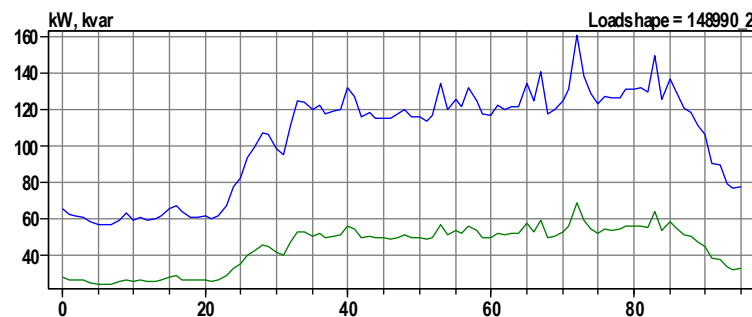


Figura 34 - Curvas de carga agregadas para potência ativa e reativa (96 pontos) – Fase b

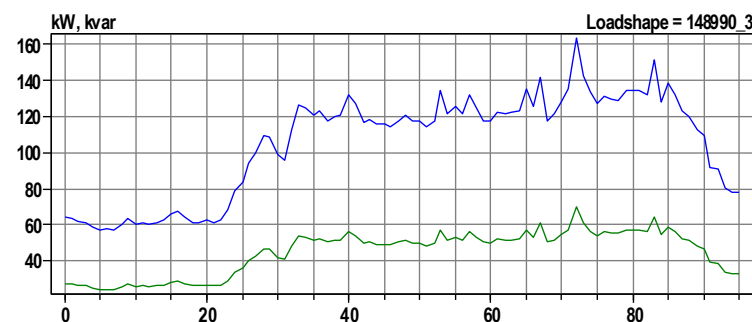


Figura 35 - Curvas de carga agregadas para potência ativa e reativa (96 pontos) – Fase c

Além dos circuitos das linhas e das cargas o barramento da subestação foi modelado como um barramento infinito com a tensão nominal em 1 p.u. equilibrada (tensão nominal do alimentador 13,8 kV). Ademais, esse alimentador não possui reguladores de tensão ou banco de capacitores, dispensando a modelagem de tais equipamentos.

De posse do modelo do alimentador foi utilizado o *software* OpenDSS para realizar a análise estática da condição operacional do alimentador através do cálculo do fluxo de potência. As seções a seguir descrevem essas análises em dois cenários: (1) Análise no horário de pico, que corresponde à análise estática em um instante de interesse; (2) Análise ao longo de um dia de operação, que corresponde a análise estática para cada intervalo de 15 minutos referentes às curvas de carga.

6.2.2. Análise em horário de pico

A análise estática do alimentador em horário de pico consiste na solução do fluxo de potência do circuito em um único instante de interesse. No caso do alimentador da CPFL em específico, o horário de pico foi identificado como o ponto 73 da curva de carga, o que representa o horário das 18:15hs. No software OpenDSS o modo de solução utilizado para este tipo de simulação é o *Snapshot*.

O estudo da condição operacional do alimentador em seu instante de maior carregamento é de grande interesse das companhias do setor de distribuição de energia elétrica, pois permite que os equipamentos da rede de distribuição sejam dimensionados para operarem de maneira adequada e que fornecimento de energia esteja dentro dos padrões de qualidade admitidos pelo PRODIST (ANEEL, 2016b). A Figura 36 mostra o resultado da simulação no OpenDSS para o perfil de tensões ao longo do alimentador da CPFL, de modo que em preto tem-se a fase a, em vermelho a fase b e finalmente em azul a fase c. O resultado completo do fluxo de potência, com as tensões nodais em todas as barras encontra-se disponível para o leitor no Apêndice B.

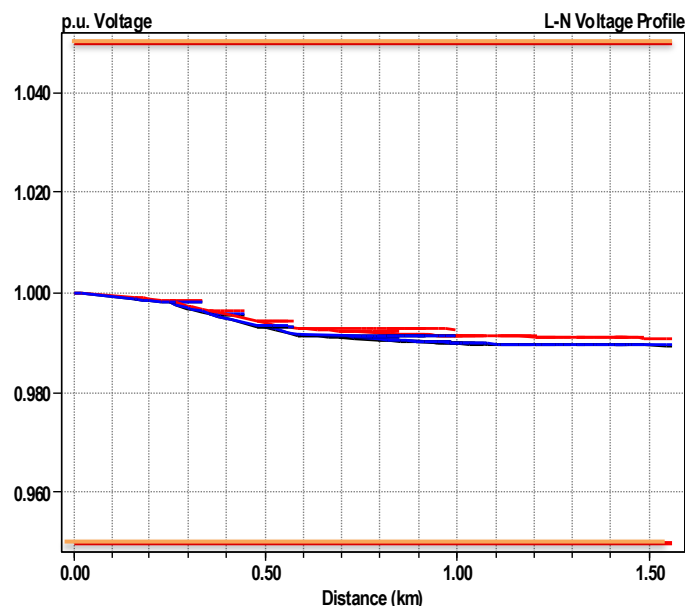


Figura 36 - Perfil de tensões ao longo do alimentador da CPFL.

A análise da Figura 36 mostra que a tensão encontra-se bastante próxima da nominal em toda a extensão do alimentador, não apresentando violação dos limites de tensão, caracterizados pelas bandas de 0,05 p.u. destacadas em vermelho e regulamentadas pelo PRODIST (ANEEL, 2016b). Este comportamento pode ser associado ao fato de este ser um alimentador curto operando em média tensão.

Fazendo um paralelo com a rede teste do IEEE 13 barras, nota-se que ambos possuem comprimentos próximos a 1,5km além de carregamentos bastante similares. No entanto, como se pode observar na Figura 31 a rede de 13 barras apresenta maiores quedas de tensão quando comparadas ao alimentador da CPFL (Figura 36). Neste caso, é válido ressaltar que a tensão de operação da rede teste do IEEE é de 4,16kV, bem abaixo da tensão em que opera o alimentador estudado, que é de 13,8kV. Deste modo, as maiores quedas de tensão na rede teste do IEEE podem ser explicadas por maiores correntes operacionais que decorrem da tensão de operação mais baixa. Além disso, a rede teste de 13 barras apresenta ramais monofásicos e trifásicos com configurações distintas às do alimentador da CPFL, e consequentes constantes quilométricas diferentes, o que resulta em perfis de tensão distintos para cada caso.

O fator de desbalanço de tensão máximo encontrado foi de 0,1%. A razão disto é que todos os ramos do alimentador da CPFL são trifásicos, ou seja, sem ramais monofásicos ou bifásicos, e as cargas são relativamente pouco desbalanceadas. Na Tabela 17, são apresentados as tensões mínimas e máximas operacionais para cada fase no instante analisado.

Tabela 17 - Tensões operacionais máxima e mínima por fase.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão Mínima (p.u.)	0,9893	0,9908	0,9895
Tensão Máxima (p.u.)	1,0000	1,0000	1,0000

A Tabela 18 apresenta a demanda de potência ativa e reativa total, por fase, para o alimentador da CPFL Paulista. Pouco foi comentado sobre o desbalanço de cargas uma vez que o carregamento do circuito por fase é relativamente próximo. Outro ponto interessante é o fator de potência de 0,92 igual para todos. Isso é justificado pois geralmente as metodologias de agregação de carga determinam estimativas das demanda de potência ativa sendo assumido um fator de potência típico para determinar a potência reativa (Massignan, 2016).

Tabela 18 - Demanda de potência ativa e reativa total do alimentador da CPFL Paulista.

	Fase A	Fase B	Fase C	Trifásica
Potência Ativa Total (kW)	1699,64	1583,90	1705,95	4989,49
Potência Reativa Total (kVAr)	732,81	679,14	735,63	2147,58
Fator de Potência	0,92	0,92	0,92	0,92

Além disso, obteve-se um valor de 32,73 kW de perdas totais para o alimentador da CPFL, o que representa 0,656% da demanda total do alimentador. Para esse alimentador também foi realizada uma análise no carregamento de rede, ou seja, no carregamento de cada trecho de circuito da rede aérea. Esta avaliação foi realizada por meio da ampacidade dos condutores empregados nos ramais deste alimentador. A Tabela 19 apresenta os trechos que apresentaram violação do carregamento de rede. Os demais são apresentados no Apêndice B. Apesar desses cabos apresentarem carregamento acima do nominal, vale ressaltar que a metodologia de agregação de cargas e a avaliação no horário de pico resultam em análises conservadoras do alimentador. Mas, em todo caso, ressalta-se a importância de averiguar com mais detalhes a situação destes cabos.

Tabela 19 - Violação do carregamento de rede durante o instante de máxima demanda.

Trecho de Linha	Barra DE	Barra PARA	Magnitude de Corrente			Ampacidade (A)	Carregamento (%)
			Fase A (A)	Fase B (A)	Fase C (A)		
LINHA_1	BARRA27	BARRA29	203,28	188,06	204,38	202,0	101,18
LINHA_2	BARRA29	BARRA30	203,28	188,06	204,38	202,0	101,18
LINHA_18	BARRA23	BARRA24	223,78	206,89	224,86	202,0	111,32
LINHA_19	BARRA24	BARRA25	223,67	206,78	224,75	202,0	111,26
LINHA_32	BARRA25	BARRA26	221,45	204,94	223,26	202,0	110,52
LINHA_33	BARRA26	BARRA27	215,24	198,82	217,35	202,0	107,60
LINHA_51	BARRA9	BARRA23	223,78	206,89	224,86	153,0	146,97

A seção a seguir apresenta os resultados obtidos no cálculo de fluxo de potência para o alimentador da CPFL ao longo de um dia.

6.2.3. Análise ao longo de um dia

A análise de um alimentador de distribuição ao longo de um dia corresponde à múltiplas soluções de fluxo de potência, cada uma para determinado instante de tempo. No caso do alimentador da CPFL foram realizadas 96 soluções de fluxo de potência correspondentes aos intervalos de 15 minutos das curvas de carga agregadas.

Para realizar de forma automática estas múltiplas soluções de fluxo de potência o *software* OpenDSS dispõe de um modo de simulação específico, selecionado através da linha de comando: “Solve mode=daily number = 96”. Para obter os resultados neste modo de simulação deve-se incluir elementos específicos para o monitoramento das grandezas elétricas de interesse, durante todos os instantes simulados. No caso, o elemento *Monitor* é o responsável por esta função. Abaixo um exemplo de linha de comando que define este elemento para o monitoramento do fluxo de potência total do alimentador.

```
New Monitor.Mon1 Element=Line.Linha_54 Terminal=1 mode=1 ppolar=No
```

Realizada a simulação obtém-se uma condição operacional para cada instante de tempo. A Figura 37 apresenta o fluxo de potência ativa e reativa obtido através do elemento *monitor* inserido na primeira barra do alimentador. Em preto é a apresentado o fluxo de potência da fase A, em vermelho da fase B e em azul da fase C.

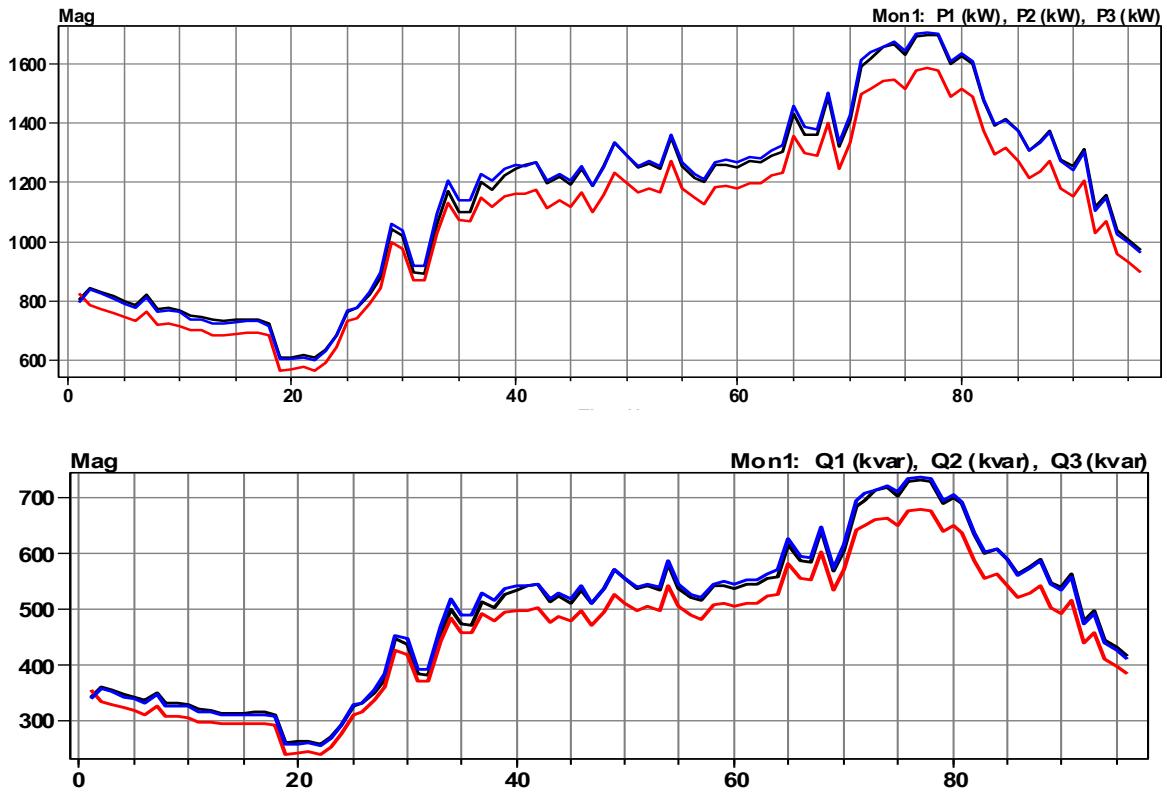


Figura 37 - Fluxo de potência ativa e reativa obtido através do elemento *monitor* inserido na saída do alimentador.

A Figura 38 apresenta a magnitude de tensão obtida através de outro elemento *Monitor* inserido na barra que apresentou a menor tensão no horário de pico (Barra 133). Em preto é apresentada a magnitude de tensão da fase A, em vermelho da fase B e em azul da fase C.

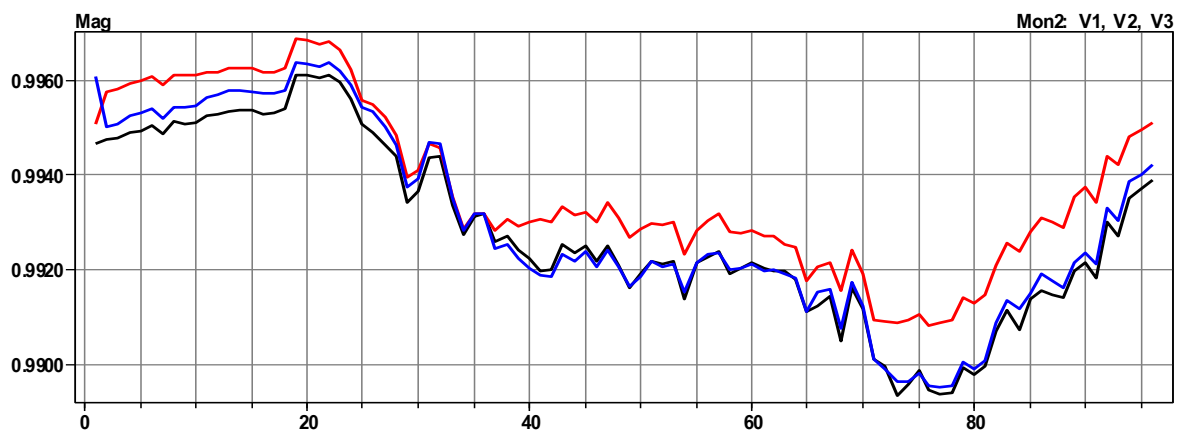


Figura 38 - Magnitudes de tensão por fase com *monitor* inserido na barra 133

Para complementar a análise do fluxo de potência do alimentador ao longo de um dia, seria interessante apontar as mesmas análises da seção anterior, realizadas para o instante de maior carregamento do circuito, apresentando o perfil de tensão, desbalanço de tensão, perdas totais e carregamento de rede, para cada instante de tempo ao longo de um dia. No entanto, a versão atual do *software* OpenDSS não apresenta ferramentas que possibilitem a extração desses dados de maneira direta. Este fato poderia ser contornado fazendo o uso da Interface COM do *software*, e operando o OpenDSS via Matlab ou VBA. Vale ressaltar que, apesar desse estudo detalhado do comportamento do circuito ao longo do dia não ter sido realizado neste trabalho, a análise realizada para o instante de pico apresentou indicadores interessantes a respeito da condição operacional do alimentador.

7. Conclusões

A obtenção de modelos trifásicos detalhados dos sistemas de distribuição de energia elétrica representa passo inicial e instrumento de grande valia para a realização de estudos mais aprofundados de tais redes, considerando suas particularidades. Estes modelos são geralmente utilizados nos mais diversos tipos de análises, dentre os quais se destacam: fluxo de potência, cálculos de curto-circuito, reconfiguração de redes, proteção, qualidade de energia e planejamento da rede.

A análise estática aplicada aos sistemas de distribuição através da solução do fluxo de potência, está amplamente relacionada com a obtenção de dados que caracterizem estes circuitos para situações operacionais específicas, reais ou fictícias. A solução do fluxo de potência para situações limites, de máximo e mínimo carregamento de alimentadores por exemplo, consegue dados importantes destinados a garantir que a condição operacional dos alimentadores de distribuição não está violando restrições operacionais e dos equipamentos, além de garantir conformidade com os limites de qualidade de energia estabelecidos nas normas do PRODIST (ANEEL, 2016b).

No presente trabalho foi realizado um estudo dos modelos trifásicos das linhas de distribuição de energia elétrica, fazendo uso do método das imagens de Carson (1926). Outro tópico de estudo foi o cálculo do fluxo de potência para sistemas de distribuição trifásicos através da ferramenta computacional OpenDSS. Para isto, modelos, parâmetros, codificação e metodologias de solução deste *software* foram estudadas com auxílio de o alimentador teste do IEEE de 13 barras, tornando possível a posterior implementação e análise de um modelo de alimentador real da distribuidora de energia CPFL Paulista.

A partir dos estudos realizados foi possível levantar um modelo trifásico de um alimentador real da CPFL Paulista. Tal alimentador apresenta trechos de linhas de dois tipos: aérea com condutores nus (denominada rede convencional) e aérea compacta com condutores cobertos. Cada arranjo ou configuração de linha identificado foi caracterizado por seus parâmetros elétricos de impedâncias série e admitâncias *shunt*, considerando a metodologia de Carson para cálculo das constantes quilométricas de circuitos de distribuição.

O memorial de cálculo, ilustrado no Capítulo 4 deste trabalho, apresenta um procedimento detalhado de como fazer a modelagem das linhas de um alimentador de distribuição real, facilitando o desenvolvimento de estudos para sistemas de distribuição que necessitem desse tipo de modelo. Inicialmente foi necessário o levantamento de uma base de dados que foi adquirida em conjunto com a CPFL Paulista, no qual foram levantados: a topologia do alimentador, os tipos e parâmetros dos cabos deste alimentador, os comprimentos de cada trecho de circuito, a disposição dos cabos nas diferentes configurações espaciais de linhas aéreas e a localização dos transformadores de distribuição (cargas do alimentador). De posse das informações necessárias, ao todo foram modeladas sete diferentes tipos de configuração de redes aéreas nuas e duas diferentes configurações para redes aéreas compactas. Um

script foi desenvolvido em Matlab, de modo a facilitar a obtenção dos parâmetros elétricos dos trechos de linha. Esse *script* utiliza os dados estruturais do condutor empregado e espaçamento das fases na cruzeta, e gera como resultado as constantes quilométricas da linha para a configuração em específico.

Dentre as dificuldades encontradas nesta etapa destaca-se o tratamento de um volume grande de informações. Deste modo, o uso de um banco de dados mais completos e direcionados para este tipo de estudo poderia ter agilizado a etapa de modelagem, uma vez que, de posse de um *script* automatizado, o levantamento de modelos trifásicos pode ser realizado para diversos trechos de alimentadores.

Já em termos do *software* OpenDSS, inicialmente foram apresentados os resultados da solução do fluxo de potência no sistema teste do IEEE de 13 barras, apresentando as principais análises trifásicas a respeito deste alimentador: perfil de tensão, desbalanço de tensão, perdas totais e carregamento de rede. A utilização de um sistema teste de menor complexidade permitiu observar as principais funcionalidades do *software* OpenDSS no que diz respeito ao cálculo de fluxo de potência e também às ferramentas disponibilizadas por este *software* para realizar a análise estática de um alimentador de distribuição.

Em seguida, foi implementado o modelo trifásico do alimentador real da CPFL Paulista no *software* OpenDSS, segundo descrito no Capítulo 5. O modelo final possui 132 barras e 131 ramos (trechos de circuitos da rede aérea), cujos parâmetros foram obtidos através das constantes quilométricas calculadas neste trabalho. De forma a complementar este modelo, foram disponibilizadas as curvas de cargas agregadas para os transformadores de distribuição, o que possibilitou a realização da análise estática deste alimentador através do cálculo do fluxo de potência pelo *software* OpenDSS.

A primeira análise foi feita considerando o horário de pico de demanda deste alimentador, ou seja, a situação de maior carregamento. Quanto ao perfil de tensão, o alimentador da CPFL apresentou pequenas quedas de tensão, mantendo-se em níveis próximos à tensão nominal. O desbalanço de tensão também apresentou um valor baixo em relação aos limites estabelecidos no PRODIST (ANEEL, 2016b). Notou-se que este alimentador apresenta um valor baixo de perdas (0,656%), o que está dentro do esperado para redes primárias de distribuição. A análise do carregamento de rede permitiu observar que sete trechos de circuitos apresentaram violação do carregamento de rede, possuindo corrente operacional acima da capacidade nominal dos cabos. Existe a possibilidade de estes cabos terem sido dimensionados para operar por tempo limitado em situações de alto carregamento. Partindo do fato de a metodologia de agregação de cargas (Massignan, 2016) e a avaliação no horário de pico resultam em análises conservadoras do alimentador, a afirmação de uma não conformidade destes cabos deve ser respaldada em outras análises. Mas, em todo caso, ressalta-se a importância de averiguar com mais detalhes a situação destes cabos.

Finalmente foi realizada a análise estática do alimentador ao longo de um dia de operação. No caso, foram realizadas 96 soluções de fluxo de potência correspondentes aos intervalos de 15 minutos das curvas de carga agregadas. Esse tipo de análise é uma funcionalidade interessante do OpenDSS, pois possibilita a realização de estudos considerando um horizonte de tempo. Neste caso, foram avaliados algumas grandezas elétricas de interesse (carregamento total do alimentador e tensão mínima) , mas a versão atual do *software* OpenDSS não dispõe de ferramentas que possibilitam a extração de análises similares às aquelas realizadas para o horário de pico de maneira direta. Este fato poderia ser contornado fazendo o uso da Interface COM do *software* e operando o OpenDSS via Matlab ou VBA, permitindo que o usuário programe e execute modos de solução customizados o que proporciona maior aptidão analítica para a solução de problemas específicos bem como capacidades gráficas para exibição de resultados.

Em suma é de grande importância o uso de modelos trifásicos detalhados para sistemas de distribuição. Tais modelos abrem horizontes para análises mais detalhadas a respeito dos alimentadores, provendo importantes informações para os centros de operação da distribuição e outras áreas de uma distribuidora de energia elétrica. Dentre as possibilidades de desenvolvimentos de trabalhos futuros destaca-se: o uso do modelo obtido neste trabalho no contexto do monitoramento em tempo real de sistemas distribuição; o uso de ferramentas avançadas de integração do *software* OpenDSS com outras linguagens de programação através da interface COM; a realização de estudos com intuito de avaliar a penetração de geração distribuída em sistemas de distribuição.

Referências

ANEEL Resolução Normativa. **MÓDULO 1 - INTRODUÇÃO: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. 9 ed. Brasília, 2016a. 61 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo1_Revisao_9/1b78da82-6503-4965-abc1-a2266eb5f4d7>. Acesso em: 09 out. 2016.

ANEEL Resolução Normativa. **MÓDULO 8 – QUALIDADE DE ENERGIA: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. 7 ed. Brasília, 2016b. 76p. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf>. Acesso em: 09 out. 2016.

CARSON, J.R.. **"Wave propagation in overhead wires with ground return"**, Bell System Technical Journal, 1926.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED-11847: Rede Primária 15kV e 25kV - Estruturas**. 2.17 ed. Campinas, 2016. 79 p. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-11847.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2016.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED-221: Condutores de Alumínio com Alma de Aço**. 2 ed. Campinas, 2007. 4 p. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-221.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2016.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED-2850: Rede Compacta - Espaçador Losangular Polimérico**. 2.3 ed. Campinas, 2012a. 3 p. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-2850.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2016.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED-3667: Projeto de Rede de Distribuição - Cálculo Elétrico**. 1.11 ed. Campinas, 2015. 36 p. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-3667.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2016.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **GED-920: Rede Compacta - Cabos Cobertos**. 2.3 ed. Campinas, 2012b. 4 p. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-920.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, COPEL. **Utilização e aplicação de redes de distribuição subterrâneas**. 1 ed. Curitiba, 2010. 27 p. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/redes_de_distribuicao_subterraneas/\\$FILE/RedesDeDistribuicaoSubterraneas-5.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/redes_de_distribuicao_subterraneas/$FILE/RedesDeDistribuicaoSubterraneas-5.pdf)>. Acesso em: 17 out. 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, COPEL. **NTC 841001: Projeto de Redes de Distribuição Urbana**. 3 ed. Curitiba, 1999. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/B05A45D6BDFCF556032574FD006D2F15/\\$FILE/NtcRDU-Dez99.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/B05A45D6BDFCF556032574FD006D2F15/$FILE/NtcRDU-Dez99.pdf)>. Acesso em: 22 set. 2016.

DUGAN, Roger C.; BALLANTI, Andrea. **The Open Distribution System Simulator (OpenDSS): Reference Guide**. 7.6 Palo Alto, CA; Electric Power Research Institute, Inc, 2016. 184p.

Disponível em: <<http://ufpr.dl.sourceforge.net/project/electricdss/OpenDSS/OpenDSSManual.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2016

ELEKTRO. **ND.02: Estruturas para Redes Aéreas Urbanas de Distribuição de Energia Elétrica**. Campinas, SP, 2014.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977. 588 p.

FREITAS, Paulo Ricardo Radatz de. **Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software OpenDSS**. 2015. 189 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **Distribution Test Feeders**: IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee's Distribution Test Feeder Working Group. 2010. Disponível em: <<https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>>. Acesso em: 25 ago. 2016.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de; ROBBA, Ernesto João. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 328 p.

KERSTING, Willian H.. **Distribution System Modeling and Analysis**. Las Cruces, New Mexico: Crc Press, 2002. 314 p.

KERSTING, W. H., Green, R. K.. **The application of Carson's equation to the steady-state analysis of distribution feeders**. 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2011, 1–6.

KERSTING, W. H., Phillips, W. H. (1995). **Distribution feeder line models**. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 31(4), 715–720.

MASSIGNAN, Julio Augusto Druzina. **Estimação de demanda em tempo real para sistemas de distribuição radiais**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

MONTEMEZZO, João Felipe. **Influência dos Parâmetros e Modelos de Linhas na Solução do Fluxo de Carga de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2016.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 164 p.

PRYSMIAN CABLES & SYSTEMS. **Redes aéreas compactas: Cabos cobertos TPR**. 1 ed. 2016. 2 p. Disponível em: <<http://br.prysmiangroup.com/br/files/tpr.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2016.

Apêndice A

Este apêndice apresenta os dados levantados a partir da documentação cedida pela CPFL, bem como as constantes quilométricas obtidas para as configurações observadas no alimentador. Esses dados são a base do modelo do alimentador da CPFL Paulista.

Tabela A1 – Dados levantados nos documentos da CPFL Paulista

DE	PARA	Config.	Comprimento
1	2		0
2	3	6	0.02096
3	4	6	0.13882
4	5	6	0.00826
4	6	6	0.02296
6	7	6	0.01641
7	8	6	0.03114
8	9	6	0.02051
9	10	5	0.01718
9	11	6	0.0188
11	12	6	0.06592
12	13	9	0.01834
13	14	9	0.023
14	15	8	0.02735
15	16	8	0.04976
13	17	9	0.05023
17	18	9	0.03411
18	19	9	0.01915
18	20	8	0.05558
20	21	8	0.01632
21	22	8	0.0235
9	23	5	0.01629
23	24	2	0.03384
24	25	2	0.00492
25	26	3	0.03125
26	27	3	0.01845
27	28	4	0.00867
27	29	1	0.02164
29	30	1	0.03399
30	31	1	0.07017
31	32	1	0.03898
32	33	1	0.0376
27	34	4	0.02732
34	35	4	0.0125
35	36	4	0.01988
36	37	4	0.01856
37	38	4	0.01509
31	39	1	0.02385
39	40	2	0.01868
40	41	2	0.01255
41	42	3	0.02073
42	43	1	0.01629
31	44	1	0.01424
44	45	1	0.03021
45	46	3	0.03214
46	48	8	0.02644
48	47	9	0.00854
48	49	9	0.16518
49	50	9	0.01803
50	51	9	0.01443
51	52	9	0.00552
52	13	9	0.02695
48	53	9	0.01985
53	54	9	0.02922
54	55	9	0.03439
55	56	6	0.02408
56	57	1	0.02093
57	58	1	0.01744
56	59	1	0.08595
59	60	1	0.06856
56	61	6	0.03873
61	62	6	0.06156
62	63	2	0.02627
63	64	2	0.03179
64	65	3	0.01606
65	66	1	0.02647
66	67	1	0.02216
67	68	1	0.03241
68	69	1	0.03653

66	70	4	0.05883
70	71	4	0.03352
66	72	4	0.06908
72	73	4	0.01714
73	74	4	0.01715
74	75	4	0.03467
75	76	4	0.0369
73	77	2	0.02532
77	78	2	0.01202
73	79	2	0.03343
62	80	6	0.03514
80	81	7	0.01758
81	82	6	0.08087
82	83	6	0.02128
83	84	6	0.01875
84	85	6	0.02699
85	86	5	0.05439
85	87	5	0.01593
87	88	2	0.03268
88	89	2	0.03386
85	90	6	0.01101
90	91	6	0.03524
91	92	6	0.04128
92	93	9	0.023
93	94	9	0.01
94	95	9	0.02212
95	96	9	0.07234
93	97	9	0.01868
97	98	9	0.03927
98	99	9	0.03018
94	100	6	0.04704
100	101	6	0.04644

101	102	2	0.01147
102	103	2	0.03517
101	104	2	0.02097
104	105	8	0.01693
105	106	8	0.0167
106	107	8	0.01588
107	108	8	0.01566
101	109	6	0.09119
109	110	9	0.013
110	111	9	0.02139
110	112	9	0.02002
112	113	9	0.02214
113	114	9	0.01055
114	115	9	0.03139
115	116	9	0.01546
116	117	8	0.02718
116	118	8	0.03447
116	119	9	0.02107
110	120	9	0.00884
120	121	9	0.03602
121	122	9	0.03477
122	123	6	0.02318
123	124	6	0.00662
124	125	6	0.02067
123	126	8	0.02383
126	127	8	0.01452
127	128	8	0.03568
123	129	8	0.02537
129	130	8	0.03166
130	131	8	0.01446
131	132	8	0.05808
132	133	8	0.01795

Tabela A2 – Configurações de linha identificadas no alimentador da CPFL Paulista.

Config.	Condutor	Ampacidade (A)	Tipo de Cruzeta	AB	BC	AC
1	1/0	202	B	600	600	1200
2	1/0	202	N	1200	600	1800
3	1/0	202	M	950	850	1800
4	02	153	B	600	600	1200
5	02	153	N	1200	600	1800

6	477	537	B	600	600	1200
7	477	537	M	950	850	1800
8	3E70	310				
9	3E185	575				

Configuração 1:

Z(R + jX) em Ohms por quilômetro					
0.65963463	1.07508265				
0.05852295	0.61678240	0.65963463	1.07508265		
0.05852295	0.56452033	0.05852295	0.61678240	0.65963463	1.07508265
Y em µF por quilômetro					
	0.00847107				
	-0.00291605		0.00913826		
	-0.00168865		-0.00291605		0.00847107

Configuração 2:

Z(R + jX) em Ohms por quilômetro					
0.65969772	1.07501949				
0.05858612	0.56433085	0.65969772	1.07501949		
0.05858612	0.53375950	0.05858612	0.61659292	0.65969772	1.07501949
Y em µF por quilômetro					
	0.00847107				
	-0.00291605		0.00913826		
	-0.00168865		-0.00291605		0.00847107

Configuração 3:

Z(R + jX) em Ohms por quilômetro					
0.659697714	1.075019493				
0.058586116	0.581944994	0.659697714	1.075019493		
0.058586116	0.533759501	0.058586116	0.59033121	0.659697714	1.075019493
Y em µF por quilômetro					
	0.008004134				
	-0.00240662		0.008572414		
	-0.00141286		-0.00256870		0.008098199

Configuração 4:

Z(R + jX) em Ohms por quilômetro					
1.016070564	1.079625396				
0.058586116	0.616592916	1.016070564	1.079625396		
0.058586116	0.564330849	0.058586116	0.616592916	1.016070564	1.079625396
Y em µF por quilômetro					
	0.008162833				
	-0.00270989		0.008755668		
	-0.00158249		-0.00270989		0.008162833

Configuração 5:

Z(R + jX) em Ohms por quilômetro					
1.016070532	1.079625396				
0.058586116	0.564330849				
0.058586116	0.533759501	1.016070532	1.079625396	1.016070532	1.079625396
Y em µF por quilômetro					

Configuração 6:

Z(R + jX) em Ohms por quilômetro					
0.193639228	0.929832714				
0.058586116	0.616592916	0.193639228	0.929832714		
0.058586116	0.564330849	0.058586116	0.616592916	0.193639228	0.929832714
Y em µF por quilômetro					
0.009903434					
-0.00370796		0.010893154			
-0.00198680		-0.00370796		0.009903434	

Configuração 7:

Z(R + jX) em Ohms por quilômetro					
0.193637403	0.929832714				
0.058586116	0.581944994	0.193637403	0.929832714		
0.058586116	0.533759501	0.058586116	0.59033121	0.193637403	0.929832714
Y em µF por quilômetro					
0.009196844					
-0.00303413		0.010027572			
-0.00168242		-0.00325343		0.009334351	

Rede Compacta**Configuração 8:**

Z(R + jX) em Ohms por quilômetro					
0.55532517	1.07735044				
0.05852678	0.77875522	0.55533283	1.07734278		
0.05852295	0.72650847	0.05852678	0.77876288	0.55532517	1.07735044
Y em µF por quilômetro					
0.03045095					
-0.01560152		0.03653745			
-0.00766451		-0.01557145		0.03045095	

Configuração 9:

Z(R + jX) em Ohms por quilômetro					
0.24302926	1.04034660	0.24303692	1.04033894	0.24302926	1.04034660
0.05852678	0.77875522				
0.05852295	0.72650847				
Y em µF por quilômetro					
	0.03611988		0.04528216		0.03611988
	-0.02006594				
	-0.00852362				

Tabela A3 – Informações dos transformadores de distribuição do alimentador CPFL

Trafos (ID)	Barra	Tipo de Instalação	Potência Nominal (kVA)	Quantidade de Consumidores
474008	3	Cabine	150,00	1
220088	6	Cabine	112,50	35
120645	7	Cabine	650,00	1
220086	8	Cabine	112,50	38
220084	11	Cabine	112,50	65
220078	15	Cabine	112,50	21
220077	16	Cabine	75,00	25
148597	17	Poste	112,50	35
220076	20	Cabine	75,00	28
220075	21	Cabine	75,00	26
220074	22	Cabine	75,00	29
543444	22	Poste	225,00	32
120646	24	Cabine	150,00	1
220090	25	Cabine	225,00	81
148675	26	Poste	88,00	14
220100	30	Cabine	112,50	62
220112	32	Cabine	225,00	54
220113	32	Cabine	150,00	27
148792	33	Poste	112,50	38
220093	34	Cabine	112,50	16
220094	35	Cabine	150,00	37
220099	36	Cabine	75,00	18
148711	37	Poste	88,00	31
220110	39	Cabine	225,00	43
220108	40	Cabine	112,50	33
220115	41	Cabine	75,00	28
220116	41	Cabine	75,00	31
303763	42	Poste	88,00	2
148745	44	Poste	112,50	13
220104	45	Cabine	112,50	16
242680	49	Poste	45,00	1
148629	50	Poste	75,00	32
398891	51	Cabine	50,00	1
310134	51	Cabine	250,00	1
474017	52	Poste	112,50	1
220101	53	Cabine	75,00	32
220105	54	Cabine	112,50	17
220114	57	Cabine	45,00	22
148783	58	Poste	150,00	45
148731	59	Poste	112,50	24
220120	61	Cabine	225,00	102
220128	63	Cabine	225,00	96
148850	64	Poste	112,50	29
220133	65	Cabine	112,50	43

220140	67	Cabine	75,00	17
220143	68	Cabine	75,00	15
220129	70	Cabine	112,50	20
937742	72	Poste	75,00	109
220160	74	Cabine	112,50	81
329465	74	Poste	112,50	1
399598	75	Cabine	500,00	1
148959	75	Poste	88,00	8
324667	77	Poste	112,50	10
220150	78	Cabine	75,00	25
220161	79	Cabine	45,00	34
120684	81	Poste	75,00	1
938243	80	Cabine	0,00	0
220149	82	Cabine	112,50	39
148919	83	Poste	112,50	40
220154	84	Cabine	75,00	60
148923	86	Poste	88,00	31
220173	88	Cabine	112,50	53
220171	88	Cabine	75,00	27
220179	89	Cabine	112,50	71
220164	90	Cabine	225,00	62
220174	91	Cabine	112,50	31
148990	95	Poste	150,00	61
220191	97	Cabine	112,50	14
220196	98	Cabine	150,00	37
329444	100	Cabine	1500,00	1
242717	100	Poste	45,00	1
220220	102	Cabine	225,00	5
220217	102	Cabine	225,00	125
329442	102	Poste	150,00	1
329443	102	Poste	150,00	1
220224	103	Cabine	150,00	61
562573	112	Poste	112,50	4
120739	113	Poste	75,00	1
220242	114	Cabine	112,50	42
149160	115	Poste	88,00	65
149155	118	Poste	45,00	30
149109	120	Poste	88,00	11
220228	121	Cabine	112,50	27
325571	124	Poste	88,00	1
120723	126	Poste	112,50	1
120722	127	Cabine	600,00	1
120728	129	Cabine	225,00	1
149094	130	Poste	112,50	34
310140	131	Cabine	112,50	1
220235	131	Cabine	112,50	44
331468	132	Poste	75,00	30
120742	133	Cabine	112,50	1

Apêndice B

Este apêndice traz o resultado completo do fluxo de potência obtido pelo OpenDSS para o modelo do alimentador da CPFL Paulista. Na Tabela B1, apresenta o resultado de magnitude e ângulos de tensões por fase em cada barra do circuito. Na Tabela B2, a análise completa do carregamento do alimentador, fazendo a comparação entre a ampacidade do condutor empregado no trecho e a maior magnitude de corrente observada entre as fases.

Tabela B1 - Resultado do fluxo de potência: tensões nodais em todas barras

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)
BARRA2	1,0000	0,0	1,0000	-120,0	1,0000	120,0
BARRA27	0,9956	-0,2	0,9963	-120,1	0,9958	119,8
BARRA29	0,9952	-0,2	0,9960	-120,1	0,9954	119,8
BARRA30	0,9945	-0,2	0,9954	-120,1	0,9947	119,8
BARRA31	0,9932	-0,2	0,9942	-120,1	0,9934	119,8
BARRA32	0,9932	-0,2	0,9942	-120,1	0,9934	119,8
BARRA33	0,9932	-0,2	0,9942	-120,1	0,9934	119,8
BARRA39	0,9932	-0,2	0,9942	-120,1	0,9934	119,8
BARRA42	0,9932	-0,2	0,9942	-120,1	0,9933	119,8
BARRA43	0,9932	-0,2	0,9942	-120,1	0,9933	119,8
BARRA44	0,9930	-0,2	0,9940	-120,1	0,9931	119,8
BARRA45	0,9924	-0,2	0,9936	-120,1	0,9926	119,8
BARRA56	0,9910	-0,3	0,9923	-120,1	0,9911	119,7
BARRA57	0,9909	-0,3	0,9923	-120,1	0,9911	119,7
BARRA58	0,9909	-0,3	0,9923	-120,1	0,9911	119,7
BARRA59	0,9909	-0,3	0,9923	-120,1	0,9911	119,7
BARRA60	0,9909	-0,3	0,9923	-120,1	0,9911	119,7
BARRA65	0,9902	-0,3	0,9917	-120,2	0,9904	119,7
BARRA66	0,9902	-0,3	0,9916	-120,2	0,9903	119,7
BARRA67	0,9902	-0,3	0,9916	-120,2	0,9903	119,7
BARRA68	0,9902	-0,3	0,9916	-120,2	0,9903	119,7
BARRA69	0,9902	-0,3	0,9916	-120,2	0,9903	119,7
BARRA23	0,9975	-0,1	0,9980	-120,1	0,9976	119,9
BARRA24	0,9968	-0,1	0,9973	-120,1	0,9969	119,9
BARRA25	0,9967	-0,1	0,9973	-120,1	0,9968	119,9
BARRA40	0,9932	-0,2	0,9942	-120,1	0,9933	119,8
BARRA41	0,9932	-0,2	0,9942	-120,1	0,9933	119,8
BARRA62	0,9905	-0,3	0,9919	-120,2	0,9907	119,7
BARRA63	0,9904	-0,3	0,9918	-120,2	0,9906	119,7

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)
BARRA64	0,9903	-0,3	0,9917	-120,2	0,9905	119,7
BARRA73	0,9899	-0,3	0,9913	-120,2	0,9900	119,7
BARRA77	0,9899	-0,3	0,9913	-120,2	0,9900	119,7
BARRA78	0,9899	-0,3	0,9913	-120,2	0,9900	119,7
BARRA79	0,9899	-0,3	0,9913	-120,2	0,9900	119,7
BARRA87	0,9899	-0,3	0,9914	-120,2	0,9901	119,7
BARRA88	0,9899	-0,3	0,9914	-120,2	0,9901	119,7
BARRA89	0,9899	-0,3	0,9914	-120,2	0,9901	119,7
BARRA101	0,9895	-0,3	0,9910	-120,2	0,9896	119,6
BARRA102	0,9895	-0,3	0,9910	-120,2	0,9896	119,6
BARRA103	0,9895	-0,3	0,9910	-120,2	0,9896	119,6
BARRA104	0,9895	-0,3	0,9910	-120,2	0,9896	119,6
BARRA26	0,9960	-0,1	0,9967	-120,1	0,9962	119,9
BARRA46	0,9919	-0,2	0,9931	-120,1	0,9920	119,8
BARRA28	0,9956	-0,2	0,9963	-120,1	0,9958	119,8
BARRA34	0,9956	-0,2	0,9963	-120,1	0,9957	119,8
BARRA35	0,9956	-0,2	0,9963	-120,1	0,9957	119,8
BARRA36	0,9956	-0,2	0,9963	-120,1	0,9957	119,8
BARRA37	0,9955	-0,2	0,9963	-120,1	0,9957	119,8
BARRA38	0,9955	-0,2	0,9963	-120,1	0,9957	119,8
BARRA70	0,9902	-0,3	0,9916	-120,2	0,9903	119,7
BARRA71	0,9902	-0,3	0,9916	-120,2	0,9903	119,7
BARRA72	0,9899	-0,3	0,9914	-120,2	0,9901	119,7
BARRA74	0,9898	-0,3	0,9913	-120,2	0,9900	119,7
BARRA75	0,9898	-0,3	0,9912	-120,2	0,9899	119,7
BARRA76	0,9898	-0,3	0,9912	-120,2	0,9899	119,7
BARRA9	0,9980	-0,1	0,9985	-120,1	0,9981	119,9
BARRA10	0,9980	-0,1	0,9985	-120,1	0,9981	119,9
BARRA85	0,9899	-0,3	0,9914	-120,2	0,9901	119,7
BARRA86	0,9899	-0,3	0,9914	-120,2	0,9901	119,7
BARRA3	0,9998	0,0	0,9999	-120,0	0,9998	120,0
BARRA4	0,9987	-0,1	0,9990	-120,0	0,9988	119,9
BARRA5	0,9987	-0,1	0,9990	-120,0	0,9988	119,9
BARRA6	0,9985	-0,1	0,9989	-120,1	0,9986	119,9
BARRA7	0,9984	-0,1	0,9988	-120,1	0,9985	119,9
BARRA8	0,9982	-0,1	0,9986	-120,1	0,9983	119,9
BARRA11	0,9980	-0,1	0,9985	-120,1	0,9981	119,9
BARRA12	0,9980	-0,1	0,9985	-120,1	0,9981	119,9
BARRA55	0,9911	-0,2	0,9924	-120,1	0,9912	119,8
BARRA61	0,9908	-0,3	0,9922	-120,2	0,9909	119,7
BARRA80	0,9904	-0,3	0,9918	-120,2	0,9906	119,7

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)
BARRA81	0,9904	-0,3	0,9918	-120,2	0,9905	119,7
BARRA82	0,9901	-0,3	0,9916	-120,2	0,9903	119,7
BARRA83	0,9901	-0,3	0,9915	-120,2	0,9902	119,7
BARRA84	0,9900	-0,3	0,9915	-120,2	0,9902	119,7
BARRA90	0,9899	-0,3	0,9914	-120,2	0,9901	119,7
BARRA91	0,9898	-0,3	0,9913	-120,2	0,9900	119,7
BARRA92	0,9898	-0,3	0,9913	-120,2	0,9899	119,7
BARRA94	0,9897	-0,3	0,9912	-120,2	0,9898	119,7
BARRA100	0,9896	-0,3	0,9911	-120,2	0,9897	119,7
BARRA109	0,9895	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA122	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9895	119,6
BARRA123	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9895	119,6
BARRA124	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9895	119,6
BARRA125	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9895	119,6
BARRA14	0,9914	-0,2	0,9926	-120,1	0,9914	119,8
BARRA15	0,9913	-0,2	0,9926	-120,1	0,9914	119,8
BARRA16	0,9913	-0,2	0,9926	-120,1	0,9914	119,8
BARRA18	0,9913	-0,2	0,9926	-120,1	0,9913	119,8
BARRA20	0,9913	-0,2	0,9926	-120,1	0,9913	119,8
BARRA21	0,9913	-0,2	0,9926	-120,1	0,9913	119,8
BARRA22	0,9913	-0,2	0,9926	-120,1	0,9913	119,8
BARRA48	0,9915	-0,2	0,9928	-120,1	0,9917	119,8
BARRA105	0,9895	-0,3	0,9910	-120,2	0,9896	119,6
BARRA106	0,9895	-0,3	0,9910	-120,2	0,9896	119,6
BARRA107	0,9895	-0,3	0,9910	-120,2	0,9896	119,6
BARRA108	0,9895	-0,3	0,9910	-120,2	0,9896	119,6
BARRA116	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA117	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA118	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA126	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9895	119,6
BARRA127	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9895	119,6
BARRA128	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9895	119,6
BARRA129	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9895	119,6
BARRA130	0,9893	-0,3	0,9908	-120,2	0,9895	119,6
BARRA131	0,9893	-0,3	0,9908	-120,2	0,9895	119,6
BARRA132	0,9893	-0,3	0,9908	-120,2	0,9895	119,6
BARRA133	0,9893	-0,3	0,9908	-120,2	0,9895	119,6
BARRA13	0,9914	-0,2	0,9926	-120,1	0,9914	119,8
BARRA17	0,9913	-0,2	0,9926	-120,1	0,9914	119,8
BARRA19	0,9913	-0,2	0,9926	-120,1	0,9913	119,8
BARRA47	0,9915	-0,2	0,9928	-120,1	0,9917	119,8

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)	Magnitude (p.u.)	Ângulo (graus)
BARRA49	0,9914	-0,2	0,9927	-120,1	0,9915	119,8
BARRA50	0,9914	-0,2	0,9927	-120,1	0,9914	119,8
BARRA51	0,9914	-0,2	0,9926	-120,1	0,9914	119,8
BARRA52	0,9914	-0,2	0,9926	-120,1	0,9914	119,8
BARRA53	0,9914	-0,2	0,9927	-120,1	0,9916	119,8
BARRA54	0,9913	-0,2	0,9926	-120,1	0,9914	119,8
BARRA93	0,9897	-0,3	0,9912	-120,2	0,9898	119,7
BARRA95	0,9897	-0,3	0,9912	-120,2	0,9898	119,7
BARRA96	0,9897	-0,3	0,9912	-120,2	0,9898	119,7
BARRA97	0,9897	-0,3	0,9912	-120,2	0,9898	119,7
BARRA98	0,9897	-0,3	0,9912	-120,2	0,9898	119,7
BARRA99	0,9897	-0,3	0,9912	-120,2	0,9898	119,7
BARRA110	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA111	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA112	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA113	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA114	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA115	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA119	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA120	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9896	119,6
BARRA121	0,9894	-0,3	0,9909	-120,2	0,9895	119,6

Tabela B2 – Carregamento do alimentador

Trecho de Linha	Barra DE	Barra PARA	Magnitude de Corrente			Ampacidade (A)	Carregamento (%)
			Fase A(A)	Fase B(A)	Fase C(A)		
LINHA_1	BARRA27	BARRA29	203,28	188,06	204,38	202,0	101,18
LINHA_2	BARRA29	BARRA30	203,28	188,06	204,38	202,0	101,18
LINHA_3	BARRA30	BARRA31	200,18	185,34	201,41	202,0	99,71
LINHA_4	BARRA31	BARRA32	6,43	7,31	6,22	202,0	3,62
LINHA_5	BARRA32	BARRA33	2,73	3,60	2,51	202,0	1,78
LINHA_6	BARRA31	BARRA39	10,68	9,15	9,69	202,0	5,29
LINHA_7	BARRA42	BARRA43	0,00	0,00	0,00	202,0	0,00
LINHA_8	BARRA31	BARRA44	183,07	168,87	185,50	202,0	91,83
LINHA_9	BARRA44	BARRA45	182,19	168,34	184,30	202,0	91,24
LINHA_10	BARRA56	BARRA57	7,75	5,22	5,50	202,0	3,84
LINHA_11	BARRA57	BARRA58	7,57	5,04	5,32	202,0	3,75
LINHA_12	BARRA56	BARRA59	5,67	4,78	5,66	202,0	2,81
LINHA_13	BARRA59	BARRA60	0,00	0,00	0,00	202,0	0,00

LINHA_14	BARRA65	BARRA66	31,55	29,83	32,87	202,0	16,27
LINHA_15	BARRA66	BARRA67	4,39	3,02	4,80	202,0	2,37
LINHA_16	BARRA67	BARRA68	2,58	1,47	2,85	202,0	1,41
LINHA_17	BARRA68	BARRA69	0,00	0,00	0,00	202,0	0,00
LINHA_18	BARRA23	BARRA24	223,78	206,89	224,86	202,0	111,32
LINHA_19	BARRA24	BARRA25	223,67	206,78	224,75	202,0	111,26
LINHA_20	BARRA39	BARRA40	8,93	7,81	7,96	202,0	4,42
LINHA_21	BARRA40	BARRA41	5,99	5,89	5,46	202,0	2,97
LINHA_22	BARRA62	BARRA63	39,72	39,03	41,60	202,0	20,59
LINHA_23	BARRA63	BARRA64	37,63	36,76	39,48	202,0	19,54
LINHA_24	BARRA73	BARRA77	4,17	2,97	4,54	202,0	2,25
LINHA_25	BARRA77	BARRA78	0,23	0,58	0,58	202,0	0,29
LINHA_26	BARRA73	BARRA79	0,99	0,75	0,96	202,0	0,49
LINHA_27	BARRA87	BARRA88	2,71	2,55	3,11	202,0	1,54
LINHA_28	BARRA88	BARRA89	1,17	1,17	1,17	202,0	0,58
LINHA_29	BARRA101	BARRA102	24,26	19,46	27,65	202,0	13,69
LINHA_30	BARRA102	BARRA103	2,19	2,47	2,47	202,0	1,22
LINHA_31	BARRA101	BARRA104	0,00	0,00	0,00	202,0	0,00
LINHA_32	BARRA25	BARRA26	221,45	204,94	223,26	202,0	110,52
LINHA_33	BARRA26	BARRA27	215,24	198,82	217,35	202,0	107,60
LINHA_34	BARRA41	BARRA42	2,23	2,23	2,23	202,0	1,10
LINHA_35	BARRA45	BARRA46	179,57	165,72	181,68	202,0	89,94
LINHA_36	BARRA64	BARRA65	34,06	32,34	35,38	202,0	17,51
LINHA_37	BARRA27	BARRA28	0,00	0,00	0,00	153,0	0,00
LINHA_38	BARRA27	BARRA34	11,96	10,76	12,97	153,0	8,48
LINHA_39	BARRA34	BARRA35	8,61	7,41	9,63	153,0	6,29
LINHA_40	BARRA35	BARRA36	5,17	4,64	5,55	153,0	3,63
LINHA_41	BARRA36	BARRA37	2,52	1,99	2,91	153,0	1,90
LINHA_42	BARRA37	BARRA38	0,00	0,00	0,00	153,0	0,00
LINHA_43	BARRA66	BARRA70	2,08	2,15	2,15	153,0	1,41
LINHA_44	BARRA70	BARRA71	0,00	0,00	0,00	153,0	0,00
LINHA_45	BARRA66	BARRA72	25,08	24,66	25,93	153,0	16,94
LINHA_46	BARRA72	BARRA73	22,85	21,09	22,01	153,0	14,93
LINHA_47	BARRA73	BARRA74	17,69	17,37	16,51	153,0	11,56
LINHA_48	BARRA74	BARRA75	12,47	13,48	12,73	153,0	8,81
LINHA_49	BARRA75	BARRA76	0,00	0,00	0,00	153,0	0,00
LINHA_50	BARRA9	BARRA10	0,00	0,00	0,00	153,0	0,00
LINHA_51	BARRA9	BARRA23	223,78	206,89	224,86	153,0	146,97
LINHA_52	BARRA85	BARRA86	2,88	1,68	2,80	153,0	1,88
LINHA_53	BARRA85	BARRA87	2,71	2,55	3,11	153,0	2,03
LINHA_54	BARRA2	BARRA3	232,31	216,30	233,17	537,0	43,42
LINHA_55	BARRA3	BARRA4	231,25	215,24	232,12	537,0	43,22
LINHA_56	BARRA4	BARRA5	0,00	0,00	0,00	537,0	0,00
LINHA_57	BARRA4	BARRA6	231,25	215,24	232,12	537,0	43,22
LINHA_58	BARRA6	BARRA7	229,75	213,34	230,58	537,0	42,94

LINHA_59	BARRA7	BARRA8	227,87	211,46	228,69	537,0	42,59
LINHA_60	BARRA8	BARRA9	226,82	210,01	227,64	537,0	42,39
LINHA_61	BARRA9	BARRA11	3,04	3,12	2,78	537,0	0,58
LINHA_62	BARRA11	BARRA12	0,00	0,00	0,00	537,0	0,00
LINHA_63	BARRA55	BARRA56	148,13	138,53	149,05	537,0	27,76
LINHA_64	BARRA56	BARRA61	134,71	128,53	137,90	537,0	25,68
LINHA_65	BARRA61	BARRA62	129,98	124,21	134,89	537,0	25,12
LINHA_66	BARRA62	BARRA80	90,26	85,18	93,29	537,0	17,37
LINHA_67	BARRA81	BARRA82	88,61	83,52	91,64	537,0	17,07
LINHA_68	BARRA82	BARRA83	86,29	80,82	89,53	537,0	16,67
LINHA_69	BARRA83	BARRA84	77,18	72,78	80,99	537,0	15,08
LINHA_70	BARRA84	BARRA85	76,51	71,69	80,66	537,0	15,02
LINHA_71	BARRA85	BARRA90	70,92	67,46	74,74	537,0	13,92
LINHA_72	BARRA90	BARRA91	66,31	64,01	71,11	537,0	13,24
LINHA_73	BARRA91	BARRA92	64,76	62,60	69,19	537,0	12,88
LINHA_74	BARRA94	BARRA100	54,90	52,74	58,93	537,0	10,97
LINHA_75	BARRA100	BARRA101	49,52	47,35	53,55	537,0	9,97
LINHA_76	BARRA101	BARRA109	25,26	27,90	25,90	537,0	5,20
LINHA_130	BARRA122	BARRA123	11,54	11,94	11,61	537,0	2,22
LINHA_131	BARRA123	BARRA124	0,00	0,00	0,00	537,0	0,00
LINHA_132	BARRA124	BARRA125	0,00	0,00	0,00	537,0	0,00
LINHA_77	BARRA80	BARRA81	90,26	85,18	93,30	537,0	17,37
LINHA_78	BARRA14	BARRA15	4,97	4,97	4,44	310,0	1,60
LINHA_79	BARRA15	BARRA16	2,80	2,81	2,56	310,0	0,91
LINHA_80	BARRA18	BARRA20	9,22	7,32	9,92	310,0	3,20
LINHA_81	BARRA20	BARRA21	7,59	5,70	8,12	310,0	2,62
LINHA_82	BARRA21	BARRA22	5,30	3,89	6,21	310,0	2,00
LINHA_83	BARRA46	BARRA48	179,57	165,72	181,68	310,0	58,61
LINHA_84	BARRA104	BARRA105	0,00	0,00	0,00	310,0	0,00
LINHA_85	BARRA105	BARRA106	0,00	0,00	0,00	310,0	0,00
LINHA_86	BARRA106	BARRA107	0,00	0,00	0,00	310,0	0,00
LINHA_87	BARRA107	BARRA108	0,00	0,00	0,00	310,0	0,00
LINHA_88	BARRA116	BARRA117	0,00	0,00	0,00	310,0	0,00
LINHA_89	BARRA116	BARRA118	1,69	2,19	1,83	310,0	0,71
LINHA_90	BARRA123	BARRA126	0,00	0,00	0,00	310,0	0,00
LINHA_91	BARRA126	BARRA127	0,00	0,00	0,00	310,0	0,00
LINHA_92	BARRA127	BARRA128	0,00	0,00	0,00	310,0	0,00
LINHA_93	BARRA123	BARRA129	11,54	11,94	11,61	310,0	3,85
LINHA_94	BARRA129	BARRA130	9,56	9,96	9,64	310,0	3,21
LINHA_95	BARRA130	BARRA131	5,47	4,66	4,68	310,0	1,77
LINHA_96	BARRA131	BARRA132	3,75	3,64	3,13	310,0	1,21
LINHA_97	BARRA132	BARRA133	0,43	0,43	0,43	310,0	0,14
LINHA_99	BARRA13	BARRA14	4,97	4,97	4,44	575,0	0,87
LINHA_100	BARRA13	BARRA17	12,08	8,34	12,03	575,0	2,10
LINHA_101	BARRA17	BARRA18	9,22	7,32	9,92	575,0	1,72

LINHA_102	BARRA18	BARRA19	0,00	0,00	0,00	575,0	0,00
LINHA_103	BARRA48	BARRA47	0,00	0,00	0,00	575,0	0,00
LINHA_104	BARRA48	BARRA49	27,99	23,75	29,15	575,0	5,07
LINHA_105	BARRA49	BARRA50	27,79	23,54	28,94	575,0	5,03
LINHA_106	BARRA50	BARRA51	25,46	21,74	24,88	575,0	4,43
LINHA_107	BARRA51	BARRA52	17,87	14,14	17,29	575,0	3,11
LINHA_108	BARRA52	BARRA13	17,05	13,32	16,47	575,0	2,96
LINHA_109	BARRA48	BARRA53	151,58	141,97	152,54	575,0	26,53
LINHA_110	BARRA53	BARRA54	150,30	140,70	151,22	575,0	26,30
LINHA_111	BARRA54	BARRA55	148,13	138,53	149,05	575,0	25,92
LINHA_112	BARRA92	BARRA93	64,76	62,60	69,19	575,0	12,03
LINHA_113	BARRA93	BARRA94	60,67	58,64	65,00	575,0	11,30
LINHA_114	BARRA94	BARRA95	5,77	5,90	6,07	575,0	1,06
LINHA_115	BARRA95	BARRA96	0,00	0,00	0,00	575,0	0,00
LINHA_116	BARRA93	BARRA97	4,09	3,96	4,19	575,0	0,73
LINHA_117	BARRA97	BARRA98	2,51	2,38	2,61	575,0	0,45
LINHA_118	BARRA98	BARRA99	0,00	0,00	0,00	575,0	0,00
LINHA_119	BARRA109	BARRA110	25,26	27,90	25,90	575,0	4,85
LINHA_120	BARRA110	BARRA111	0,00	0,00	0,00	575,0	0,00
LINHA_121	BARRA110	BARRA112	9,60	11,18	10,04	575,0	1,94
LINHA_122	BARRA112	BARRA113	8,67	10,25	9,19	575,0	1,78
LINHA_123	BARRA113	BARRA114	8,01	9,59	8,53	575,0	1,67
LINHA_124	BARRA114	BARRA115	7,55	9,04	8,00	575,0	1,57
LINHA_125	BARRA115	BARRA116	1,69	2,19	1,83	575,0	0,38
LINHA_126	BARRA116	BARRA119	0,00	0,00	0,00	575,0	0,00
LINHA_127	BARRA110	BARRA120	15,66	16,72	15,86	575,0	2,91
LINHA_128	BARRA120	BARRA121	13,30	13,43	13,73	575,0	2,39
LINHA_129	BARRA121	BARRA122	11,54	11,94	11,61	575,0	2,08