



**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Minas Gerais - Campus Formiga
Curso de Engenharia Elétrica**

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DOS ALIMENTADORES E
TRANSFORMADORES DA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE FORMIGA**

Gabriel Luiz Silva Teixeira

Formiga - MG
Março - 2014

Gabriel Luiz Silva Teixeira

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DOS ALIMENTADORES E
TRANSFORMADORES DA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE FORMIGA

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Formiga, como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Sub Área: Distribuição de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. MSc. Patrick Santos de Oliveira.

Formiga - MG

Março - 2014

T266a Teixeira, Gabriel Luiz Silva
Análise técnico-econômica dos alimentadores e transformadores da
subestação de distribuição de Formiga / Gabriel Luiz Silva Teixeira. – Formiga,
MG., 2014.

110p.: il.

Orientador: Prof. Ms. Patrick Santos de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal Minas Gerais – Campus
Formiga.

1. Distribuição de Energia Elétrica. 2. Alimentadores. 3. Transformadores.
4. Potência I. Oliveira, Patrick Santos de. II. Título.

CDD 621.31

Gabriel Luiz Silva Teixeira

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DOS ALIMENTADORES E
TRANSFORMADORES DA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE FORMIGA

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Formiga, como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ____ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Luiz Eduardo de Souza Pereira

Prof. MSc. Patrick Santos de Oliveira

Prof. MSc. Renan Souza Moura

AGRADECIMENTOS

Deus, por me iluminar e dar forças para seguir sempre firme nos caminhos da minha vida.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG, por todo o empenho em sempre tentar ensinar da melhor forma possível e por todo o suporte dado aos alunos, garantindo desta forma, excelentes profissionais.

Ao orientador, o professor Patrick Santos de Oliveira por todo o apoio dado, dúvidas tiradas, ideias e correções do trabalho.

A todos os meus professores, que em cada matéria dada em sala de aula contribuiu para o meu crescimento e aprendizado.

A todos os funcionários do IFMG por sempre serem prestativos educados e apoiadores em meu curso, em especial ao Roney, Ronaldo, Gledson e Laressa.

A todos os meus amigos, tanto os de Formiga como os de Carmo da Mata, em especial aos da república, Arthur, Lucas Leal, Pedro, Samir, Robson e aos amigos de Carmo da Mata, por todos os momentos de descontração e alegria.

A Ana Luiza por estar do meu lado a todo o momento compartilhando momentos especiais e fazer da minha vida a cada dia mais feliz.

A empresa Engelmig Elétrica pelo apoio e confiança na entrada ao mercado de trabalho, possibilitando assim uma maior compreensão sobre o sistema de distribuição de energia elétrica.

A minha família, minha enorme gratidão, por me ensinarem a nunca desistir, a ser forte a cada dia sobre qualquer problema que surja, por serem à base da pessoa que eu me tornei, em especial aos meus pais por serem as principais pessoas responsáveis pela minha formação, amo vocês!

RESUMO

Este trabalho visa apresentar uma análise metodológica para viabilizar as condições de potência de energia dos alimentadores do sistema de distribuição de energia elétrica da subestação de Formiga/MG. Foi realizado dois levantamentos de campo, o primeiro considerando-se as estruturas encontradas no sistema de distribuição de energia elétrica urbana e rural e da quantidade e característica dos transformadores conectados a um dos alimentadores da subestação. Com estes dados foi possível fazer o balanço energético entre as três fases do alimentador e definir qual é a demanda exigida. O segundo levantamento foi realizado considerando-se as estruturas, distâncias entre os postes, tipos de cabos, características do sistema de distribuição por todo perímetro urbano e 4 Km de rural para análise de repotenciação do mesmo alimentador do primeiro levantamento. Assim, foi possível fazer uma análise técnica-econômica de um dos alimentadores do sistema de distribuição de Formiga. Todas as etapas, resultados e conclusões sobre este trabalho são apresentados neste documento.

Palavras Chave: Distribuição de energia elétrica, Alimentadores, Transformadores, Potência.

ABSTRACT

This paper presents a methodological analysis for check conditions of the power supply at the feeders of the distribution utility of Formiga/MG. Two field surveys were conducted, the first considering the structures found at the electricity urban and rural distribution systems and the amount and characteristics of transformers connected to one of the feeders of the distribution substation. With the data it was possible to make the energy balance between the three phases of the feeder and define which was the demand required by feeder. The second survey was conducted considering the structures, distances between poles, cable types, characteristics of the distribution system throughout the urban perimeter and 4 Km from rural area to analysis of repowering of the same feeder of the first field survey. Thus, it was possible to make a technical-economic analysis of one of the feeders of the distribution system of Formiga/MG. All the stages, findings and conclusions on this work are presented in this document.

Keywords: Electric power distribution, Feeders, Transformers, Electric Power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aumento de consumo de energia elétrica em porcentagem.	18
Figura 2 – Matriz energética brasileira em 2011 e 2012.	18
Figura 3 – Mapa de Formiga-MG.	22
Figura 4 – Barra Simples de uma SE.	25
Figura 5 – Barra Simples Seccionada de uma SE.	25
Figura 6 – Barra Principal e de Transferência de uma SE.	26
Figura 7 – Circuito primário, secundário e transformador.	28
Figura 8 – Entrada da linha de subtransmissão na SE de Formiga.	37
Figura 9 – Saída dos cinco alimentadores da SE de Formiga.....	38
Figura 10 – Chave Faca 630 A na saída do FMA 03.	39
Figura 11 – Conjunto de medição na saída da SE.	41
Figura 12 – Diagrama unifilar da SE de Formiga.	42
Figura 13 – Identificação de poste.	48
Figura 14 – Poste de Seção Circular.....	48
Figura 15 – Poste de Madeira.	49
Figura 16 – Poste Duplo T.....	49
Figura 17 – Estrutura U1 com NBI de 170 kV.	52
Figura 18 – Estrutura U1 com NBI de 300 kV.	52
Figura 19 – Estrutura U2 meio de rede com NBI de 95 kV.	53
Figura 20 – Estrutura U4 utilizada no rural com NBI de 95 kV.	53
Figura 21 – Estrutura U3.2 em zona urbana.	54
Figura 22 – Estrutura N1 em poste de madeira, NBI 300 kV.....	55
Figura 23 – Estrutura N2 de NBI 170 kV, vista frontal.....	56
Figura 24 – Estrutura N2 de NBI 170 kV, vista de topo.....	56
Figura 25 – Estrutura N3 de NBI 170 kV, vista frontal.....	57
Figura 26 – Estrutura N3 de NBI 170 kV, vista de topo.....	57
Figura 27 – Estrutura N4 de NBI 170 kV.	58
Figura 28 – Estrutura M1 de NBI 170 kV.....	59
Figura 29 – Estrutura M2 de NBI 95 kV e transformador.	60
Figura 30 – Estrutura M3 de NBI 170 kV.....	60
Figura 31 – Estrutura M4 de NBI 170 kV e chave faca aberta.	61

Figura 32 – Estrutura B1 de NBI 170 kV.	62
Figura 33 – Estrutura B2 para cabo protegido.....	63
Figura 34 – Estrutura B3, vista frontal.	63
Figura 35 – Estrutura B3, vista do topo.	64
Figura 36 – Estrutura B4 de NBI 170 kV.	64
Figura 37 – Estrutura CE1.....	65
Figura 38 – Estrutura CE1S.	66
Figura 39 – Estrutura CE2.....	66
Figura 40 – Estrutura CE3.....	67
Figura 41 – Estrutura CE4.....	67
Figura 42 – Estrutura CEJ1.	68
Figura 43 – Estrutura CEJ2.	69
Figura 44 – Estrutura CM1.	70
Figura 45 – Estrutura CM2.	71
Figura 46 – Estrutura CM3.	71
Figura 47 – Estrutura CM4.	72
Figura 48 – Vista frontal e de topo da estrutura HTE.	73
Figura 49 – Transformador com dados pintados em sua carcaça.....	74
Figura 50 – Transformador padronizado.	75
Figura 51 – Curva de demanda do alimentador três.	80
Figura 52 – Levantamento de Campo no entorno da SE.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de energia elétrica no Brasil em 2012.....	18
Tabela 2 – Condições de sobrecarga dos alimentadores e transformador da SE.....	20
Tabela 3 – Tensões padronizadas no Brasil segundo ANEEL (2011).....	23
Tabela 4 – Seção dos condutores convencionais encontrados no Sistema de Distribuição.....	30
Tabela 5 – Transformadores padronizados pela Cemig.....	30
Tabela 6 – Cabos na saída dos cinco alimentadores.....	40
Tabela 7 – Estrutura de conexão do conjunto de medição.....	40
Tabela 8 – Tipos de poste de concreto circular.....	44
Tabela 9 – Tipos de poste de madeira.....	45
Tabela 10 – Tipos de poste duplo T.....	46
Tabela 11 – Características das estruturas tipo U.....	52
Tabela 12 – Características das estruturas tipo N.....	55
Tabela 13 – Características das estruturas tipo M.....	59
Tabela 14 – Características das estruturas tipo B.....	62
Tabela 15 – Características das estruturas tipo CE.....	65
Tabela 16 – Características das estruturas tipo CEJ.....	68
Tabela 17 – Características das estruturas tipo CM.....	70
Tabela 18 – Balanço entre as fases do alimentador três.....	80
Tabela 19 – Preços de postes.....	83
Tabela 20 – Potência zona urbana e rural do alimentador três.....	83
Tabela 21 – Transformador com maior potência no alimentador três.....	84
Tabela 22 – Chaves de manobra do alimentador três.....	85
Tabela 23 – Relação entre vãos adjacentes.....	86
Tabela 24 – Correntes em cabos convencionais.....	87
Tabela 25 – Correntes em cabos protegidos.....	87
Tabela 26 – Potências existentes e futuras com a repotenciação.....	88
Tabela 27 – Materiais utilizados na Repotenciação.....	94
Tabela 28 – Materiais utilizados na extensão de novo alimentador.....	96
Tabela 29 – <i>Check-List</i> com os dados do primeiro levantamento.....	108
Tabela 30 – <i>Check-List</i> com os dados do segundo levantamento.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1N5	Cabo de Aço Aluminizado
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BT	Baixa Tensão
CA	Cabo de Alumínio
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ET	Estação Transformadoras
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
LT	Linhas de Transmissão
MT	Média Tensão
NBI	Nível Básico de Isolamento
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional
SE	Subestação de Energia Elétrica
VAN	Vão Anterior
VPO	Vão Posterior

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO	16
1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	16
1.3. HIPÓTESE	19
1.4. JUSTIFICATIVA	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	23
2.2. REPOTENCIAÇÃO	30
2.3. PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS	32
3. ESTRUTURA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	35
3.1. SUBESTAÇÃO.....	36
3.2. POSTES.....	43
3.3. ESTRUTURA PRIMÁRIA.....	50
3.3.1. ESTRUTURA TIPO “U”	51
3.3.2. ESTRUTURA TIPO “N”	54
3.3.3. ESTRUTURA TIPO “M”	58
3.3.4. ESTRUTURA TIPO “B”	61
3.3.5. ESTRUTURA TIPO “CE”	65
3.3.6. ESTRUTURA TIPO “CEJ”	68
3.3.7. ESTRUTURA TIPO “CM”	69
3.3.8. ESTRUTURA “HTE”	72
3.4. TRANSFORMADORES	74
3.5. ESTAI.....	75
3.6. LEVANTAMENTO DE CAMPO.....	77
4. RESULTADOS	79
4.1. ANÁLISE DE POTÊNCIA.....	79

4.2. RECONDUTORAMENTO	85
5. CONCLUSÃO.....	100
5.1. CONTINUIDADE DO TRABALHO	102
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXO A – LEVANTAMENTO DE CAMPO NA SUBESTAÇÃO.....	107
ANEXO B – LEVANTAMENTO DE CAMPO – <i>CHECK-LIST</i>	108
ANEXO C – SEGUNDO LEVANTAMENTO DE CAMPO – <i>CHECK-LIST</i>	109

1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro pode ser subdividido em três grandes grupos: geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A geração tem a função de converter uma forma de energia em energia elétrica, a transmissão tem a função de transportar a energia dos centros de produção até os centros de consumo e a distribuição tem a função de receber energia elétrica do sistema de transmissão e distribuir para os consumidores finais.

Houve uma grande mudança na estrutura do setor elétrico devido ao desmembramento das empresas de energia elétrica e o surgimento de empresas com finalidades e funções específicas em geração, transmissão e distribuição. Como forma de padronizar as empresas de energia elétrica surgiu a necessidade de órgãos reguladores, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para ditar regras e fiscalizar a prestação de serviço de energia elétrica para os consumidores finais (KAGAN et al, 2010). Ao mesmo tempo, a tecnologia evoluiu de tal forma que, foram sendo utilizados equipamentos digitais no sistema de distribuição, tornando-o mais sensível à qualidade de energia elétrica (DUGAN et al, 2012).

A energia elétrica é utilizada em tudo o que o homem faz na vida atual, é utilizada no trabalho, no lazer, em casa, tornando-se essencial para a vida, é inclusive um dos indicadores para medir o Índice de Desenvolvimento Humano da população de um país (IDH). Todo homem moderno precisa de energia elétrica em tempo integral sendo para conforto, comodidade, bem-estar, trabalho e praticidade. A falta de energia elétrica pode causar descontentamento ao cliente, e em alguns casos podem ocorrer danos materiais ou morais pela falta de energia na rede, o cliente chega até a processar a concessionária de energia, em nosso caso a Cemig. Não só a falta de energia causa transtorno, como também a má qualidade da energia pode gerar descontentamento e prejuízos, tanto para os consumidores quanto às concessionárias.

O consumo de energia vem aumentando constantemente, e para suprir essa demanda de energia sem atrapalhar no fornecimento e qualidade para todos os clientes, não basta investir somente em geração e transmissão, pois o sistema de

distribuição deve acompanhar esse aumento de capacidade. Segundo a EPE: Balanço Energético Nacional (2013), o aumento de consumo final de energia elétrica foi de 3,8% do ano de 2011 para o ano de 2012 e os principais consumidores causadores desse aumento foram os clientes residenciais e o setor de serviços.

Uma opção que deve ser utilizada é o melhor aproveitamento dos alimentadores das linhas de distribuição e os próprios transformadores das subestações de distribuição.

A repotenciação é uma forma mais rápida e econômica de ampliar a capacidade do sistema de distribuição de energia elétrica.

Dentre as técnicas utilizadas, citam-se:

- Alteração do limite térmico da linha;
- Recondutoramento;
- Elevação da tensão operativa.

Outra forma de aumentar o fornecimento de energia, aliviando a sobrecarga no alimentador de distribuição é acrescentar mais alimentadores para atender os vários tipos de consumidores ou a criação de outra subestação com novos alimentadores para aliviar a sobrecarga da SE que possui sobrecarga.

IBGE (2013) mostra que a cidade de Formiga possui uma área territorial de 1.501,915 km² com densidade demográfica de 43,36 hab/km², no senso de 2010 a cidade de Formiga possuía 65.128 habitantes e no senso de 2013, 67.617 pessoas. Obtendo um aumento de 2.489 habitantes nos últimos três anos, cerca de 830 hab/ano. Segundo (WERNECK et al., 2012), a média no Brasil é de 3,2 habitantes por residência, assim, de 2010 a 2013 teve um aumento de 777,8 residências novas que a companhia de energia (Cemig) teve que suprir. Isto considerando dados estatísticos do IBGE para os consumidores residenciais que necessitam somente de 9,4% da energia consumida no Brasil, sem contar os consumidores comerciais que consomem 4,5% e as indústrias, os consumidores que mais demandam energia elétrica com 35,1% (EPE, 2013).

A Cemig deve fornecer energia elétrica para todos os novos clientes, podendo ser consumidores residenciais, comerciais ou industriais. Uma subestação (SE) de energia tem como função receber a energia das linhas de transmissão, abaixar o nível de tensão e direcionar o fluxo de energia em sistema de distribuição por seus

alimentadores. Além de aumentar a capacidade do sistema, deve-se readequar o sistema de proteção para detectar os diferentes tipos de faltas que podem ocorrer, isolando os trechos onde as falhas se encontram, através de equipamentos de proteção e manobra (DUAILIBE, 1999).

É comum a existência de SE de distribuição de energia elétrica operar em sobrecarga de 20% a 25%, como é o caso das SE's de Anhanguera, Xavantes e Palmeiras que atualmente estão com 20% de sobrecarga. Para aliviar a sobrecarga das SE's de Anhanguera e Xavantes inseriu-se a SE de Carajás e para aliviar a sobrecarga de Palmeiras, está sendo construída a nova linha de transmissão, LT Palmeiras – Carajás com 230 kV (MARCELINO, et al, 2009). A sobrecarga não é uma situação desejável porque aumenta as perdas técnicas e diminui a vida útil dos equipamentos que a constitui como é o caso dos transformadores.

A SE de Formiga-MG pertence a Cemig. Uma linha de subtransmissão de 69 kV proveniente da cidade de Arcos-MG fornece energia para esta SE de distribuição. Na SE de Formiga existem dois transformadores abaixadores trabalhando em paralelo e cada um possui potência de 12,5 MVA e relação de 69 kV/13,8 kV que distribuem a energia elétrica por toda a cidade através de 5 alimentadores.

Este trabalho propõe uma análise das condições de todas as estruturas do sistema de distribuição de energia elétrica da subestação da cidade de Formiga-MG tanto em zona urbana quanto rural. Devido a grande quantidade de tempo que levaria para percorrer todos os 5 alimentadores da SE, considerando-se sua extensão e número de equipamentos instalados, optou-se pelo levantamento de todos os transformadores conectados e estruturas presentes apenas no alimentador três da SE, pois este é um alimentador que possui alta potência instalada e também um dos alimentadores mais antigos.

Pretende-se, portanto, com este trabalho, realizar um estudo técnico e econômico sobre as condições dos alimentadores e qual seria o melhor método para conectar mais consumidores sem afetar o fornecimento e a qualidade da energia entregue pelos alimentadores.

O conteúdo do trabalho está dividido nos seguintes capítulos: no capítulo 2, um levantamento bibliográfico do sistema de distribuição e das possíveis soluções foram abordados, tanto referente à repotenciação das linhas de distribuição como a

solução de acréscimo de novos alimentadores para atendimento do aumento de demanda.

O capítulo 3 apresenta todas as estruturas encontradas no sistema de distribuição da SE de Formiga e também todas as estações transformadoras conectadas aos alimentadores.

Já o capítulo 4 mostra os resultados das cargas encontradas no alimentador três, balanceamento das três fases conectadas nos transformadores do alimentador três, clientes com maiores potências, chaves para que conectam o alimentador três com outros alimentadores, a aplicação da técnica de repotenciação, os valores de todos os materiais e mão de obra de projeto e construção da repotenciação e da construção de uma linha nova e os tipos de estruturas encontradas no sistema de distribuição.

Por fim, são apresentadas as conclusões e a análise do estudo do sistema de distribuição e algumas sugestões de propostas para trabalhos futuros.

1.1. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO

Este presente projeto tem como objetivo geral o estudo detalhado das condições dos alimentadores da SE de Formiga e o estado das estruturas encontradas no sistema de distribuição de Formiga.

O trabalho analisa a situação de um dos alimentadores da SE de Distribuição de Formiga, e qual método de repotenciação é mais viável, tanto do ponto de vista econômico quanto técnico, para implantação e conseqüente melhoria da capacidade de transmissão de energia elétrica.

1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O Brasil realiza todo ano o Balanço Energético Nacional (BEN), baseado em pesquisas com base de dados ampla atualizada anualmente. Sua finalidade é

apresentar a contabilização relativa de oferta e consumo de energia no Brasil. O BEN é tido como um documento de referência para dados de energia, o BEN utilizado neste trabalho é o BEN de 2013 com ano base 2012, ou seja, reúne informações de como se utilizou energia no Brasil em 2012. Nesse trabalho o BEN é utilizado para mostrar quem são os responsáveis pelo aumento de consumo de energia e qual é o valor do aumento de consumo de energia.

Em 2012, a demanda total de energia do Brasil teve aumento de 4,1%, dentre outros setores, o setor de energia elétrica teve aumento de 1.835 MW na potência instalada do parque hidrelétrico, apesar desse aumento a oferta de energia hidráulica reduziu-se em 1,9% devido às condições hidráulicas na segunda metade de 2012, a menor oferta hídrica explica o recuo de oferta de renováveis na matriz energética de 88,9% em 2011 para 84,5% em 2012. A energia eólica atingiu 1.894MW, o que proporcionou o dobro da fatia de sua contribuição para a matriz energética. Esse aumento de energia eólica e o aumento da energia térmica sustentou o aumento de consumo final de eletricidade de 3,8%. Os maiores consumidores para o aumento de consumo foram as residências e o setor de serviços (EPE, 2013).

A Tabela 1 mostra o consumo de energia elétrica no Brasil comparando o ano de 2011 com 2012, com medidas de Tera Watts Hora (Twh). A Figura 1 mostra o aumento de energia elétrica em porcentagem, considerando o consumo de eletricidade, as perdas e a energia disponível. Como se observa houve um aumento no consumo total de eletricidade e também um aumento das perdas, esse aumento das perdas teve acréscimo por causa da maior utilização de energia térmica, pois o rendimento para conversão de energia térmica em eletricidade é inferior ao da conversão da usina hidrelétrica.

A Figura 2 mostra a diferença em porcentagem dos segmentos: hidráulica, biomassa, eólica, gás natural, derivados do petróleo, nuclear e carvão na matriz energética brasileira em relação ao ano de 2011 e 2012.

Tabela 1 – Consumo de energia elétrica no Brasil em 2012.

	Valores em Twh 2012	Valores em Twh 2011
Energia Elétrica Disponibilizada	592,8	567,6
Consumo Final	498,4	480,1
Perdas (comerciais + técnicas)	94,4	87,5
Perdas (%)	15,9	15,4

Fonte: Balanço Energético Nacional: Relatório Síntese (2013, p. 30).

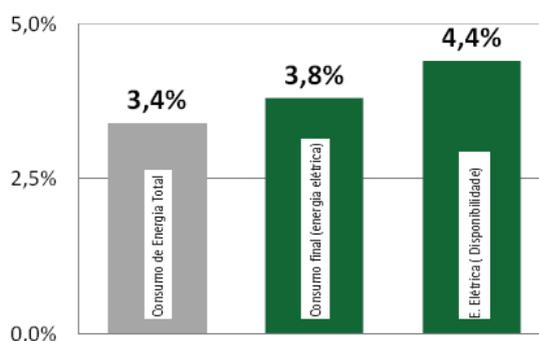


Figura 1 – Aumento de consumo de energia elétrica em porcentagem.

Fonte: Balanço Energético Nacional: Relatório Síntese (2013, p. 30).

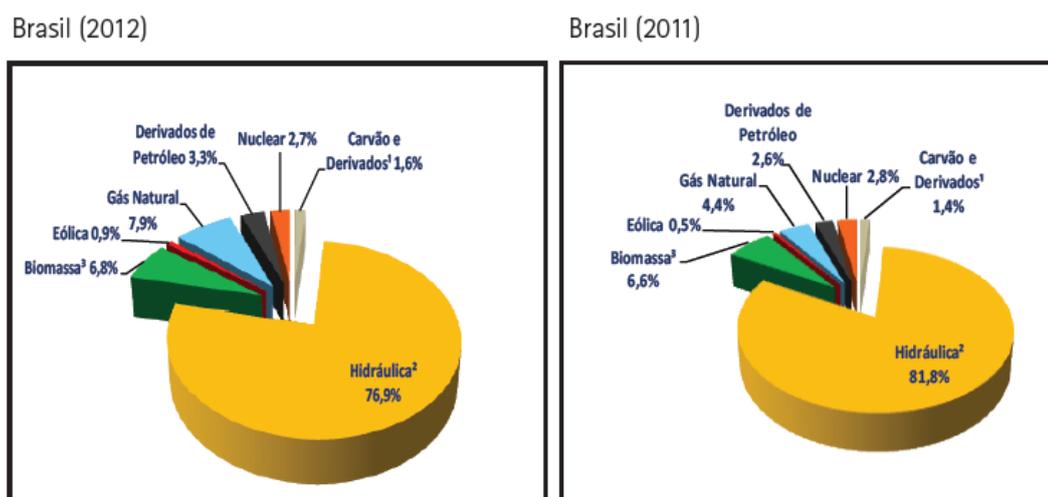


Figura 2 – Matriz energética brasileira em 2011 e 2012.

Fonte: Balanço Energético Nacional: Relatório Síntese (2013, p. 31).

Os dados acima mostram que aumentou o consumo de energia elétrica no Brasil. E os responsáveis por esse aumento são consumidores residenciais e comerciais segundo Balanço Energético Nacional (2013) e, esses tipos de consumidores são sempre conectados ao sistema de distribuição. Desta forma, colocam-se algumas questões: como estaria o estado dos alimentadores das SE's das cidades brasileiras? Como estaria o estado dos transformadores das SE's?

Segundo IBGE (2013), a cidade de Formiga teve um aumento populacional de 2.489 habitantes nos últimos três anos, segundo (WERNECK et al., 2012), a média no Brasil é de 3,2 habitantes por residência, assim houve um aumento de cerca de 777,8 residências que a Cemig teve que suprir com os alimentadores da SE de Formiga. Isto considerando dados estatísticos do IBGE para consumidores residenciais, não incluindo o aumento de consumidores comerciais e industriais.

1.3. HIPÓTESE

O sistema de distribuição tem a função de fornecer energia elétrica a todos os tipos de consumidores com qualidade no momento em que for solicitada e com a demanda necessária para cada cliente. Para isto, a concessionária de energia elétrica realiza manutenções preventivas e corretivas nas linhas de distribuição, e para os clientes do alimentador, onde será executada a manutenção, não ficarem sem energia, utilizam-se chaves que conectam alimentadores para transferir carga e diminuir a duração das interrupções do suprimento de energia. Essas chaves também são utilizadas para isolar área e transferir carga quando o sistema sofre uma falta devido a curto-circuito, por falhas em isoladores ou quedas de árvores, ou quando o alimentador está trabalhando com sobrecarga, transferindo assim uma parte da carga para outro alimentador.

A partir da possível sobrecarga dos cinco alimentadores da SE ou da sobrecarga dos dois transformadores que trabalham em paralelo na SE de Formiga, foram observadas algumas hipóteses as quais poderiam ser aplicadas no sistema de distribuição de Formiga a fim de encontrar o problema de demanda, desde a melhor

situação com nenhuma sobrecarga no sistema até a pior situação, com os alimentadores e os transformadores sobrecarregados, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Condições de sobrecarga dos alimentadores e transformador da SE.

Alimentador (sobrecarregado)	Transformador da SE (sobrecarregado)
Nenhum	Não
1 alimentador	Não
2 alimentadores	Não
3 alimentadores	Não
4 alimentadores	Não
5 alimentadores	Não
Nenhum	Sim
1 alimentador	Sim
2 alimentadores	Sim
3 alimentadores	Sim
4 alimentadores	Sim
5 alimentadores	Sim

1.4. JUSTIFICATIVA

O projeto inicia-se a partir da análise do sistema de distribuição da cidade de Formiga, a situação dos transformadores e dos cinco alimentadores. A partir deste levantamento, o resultado nos mostrará qual o melhor método a ser utilizado, podendo ser repotenciação das linhas de distribuição, troca de transformador da SE, aumento de mais alimentadores na SE ou até a construção de uma nova SE em Formiga.

Este estudo justifica-se com o objetivo de ampliar a capacidade de transmissão de energia elétrica da SE de distribuição de energia elétrica de Formiga, primando pela qualidade do fornecimento e do produto, seguindo os critérios de distribuição estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2013). O PRODIST define os procedimentos do sistema de distribuição, elaborados pela ANEEL para

normalizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Além de melhorar as condições de fornecimento de energia para os consumidores, o estudo deve apontar a alternativa mais viável para a concessionária de energia, que poderá suprir o aumento da demanda e ainda aliviar o carregamento dos equipamentos instalados no sistema.

Assim, todos os equipamentos estarão trabalhando em condições normais e não irá ocorrer depreciação ou desgaste por diminuição da vida útil por causa do trabalho em sobrecarga.

O método a ser escolhido para reconfiguração do sistema, será o que possuir o melhor custo/benefício ocasionando uma minimização de gastos para a concessionária de energia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A análise do sistema de distribuição foi realizada na cidade de Formiga. Os alimentadores da SE fornecem energia elétrica tanto para a região urbana como para a região rural de Formiga e de algumas cidades vizinhas, caracterizando extensas linhas de distribuição. A Figura 3 mostra o mapa do território de Formiga e os nomes das cidades vizinhas.

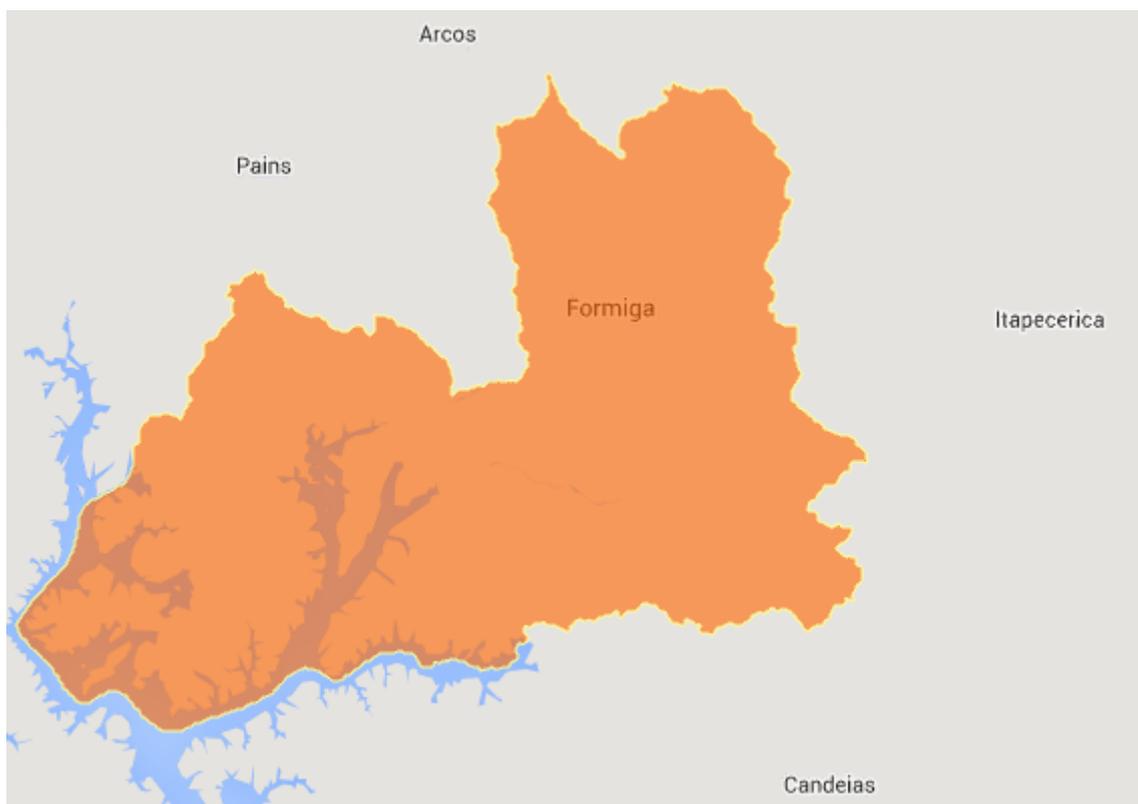


Figura 3 – Mapa de Formiga-MG.

Disponível em: <https://maps.google.com.br>

Acesso em: 21 dez. 2013

2.1. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

As SE's de distribuição são responsáveis por receber energia do sistema de subtransmissão em nível de tensão elevado e reduzir em nível de tensão com padrões determinados para o sistema de distribuição. A Tabela 3 mostra os níveis de tensão encontrados no Brasil decretado pela ANEEL (2011).

Tabela 3 – Tensões padronizadas no Brasil segundo ANEEL (2011).

Padronizada (kV)	Campo de Aplicação	Área do sistema de Potência	
0,127/0,254	Distribuição Secundária Monofásica	Distribuição	
0,220/0,440			
0,127/0,220	Distribuição Secundária Trifásica		
0,380/0,220			
13,8	Distribuição Primária		
34,5			
34,5	Subtransmissão		Transmissão
69,0			
138,0			
138,0	Transmissão		
230,0			
500,0			
750,0			

Existem vários tipos de arranjos de SE's, por exemplo, a SE com carga na ordem de 10 MVA o arranjo bastante utilizado é o de barra simples segundo Kagan (2010). O arranjo mais simples e barato. Neste arranjo todos os alimentadores se conectam à mesma barra e na falta da linha de suprimento, todo o sistema fica sem energia. Podem haver uma ou mais linhas de suprimento, se for suprida por apenas uma linha de suprimento na alta tensão, terá somente proteção no transformador, obtendo uma baixa confiabilidade. Uma forma de aumentar a confiabilidade é

acrescentando mais linhas de suprimento. A Figura 4 mostra como é um arranjo de barra simples em uma SE.

Em áreas com maior densidade de carga utilizam-se dois ou mais transformadores em paralelo, aumentando a confiabilidade do sistema e a facilidade nos serviços de manutenção. O sistema de proteção da SE se torna mais completo e o custo da SE é mais elevado que o da barra simples. Este arranjo de SE se denomina barra simples seccionada. Neste sistema quando ocorre manutenção de um dos transformadores que está em paralelo, abrem-se as chaves a jusante e a montante do transformador, isolando-o. A seguir, fecha-se a barra seccionadora, transferindo toda potência de uma linha de suprimento para a outra. Quando existe mais de um transformador na SE, define-se como potência total instalada da SE a soma das potências de todos os transformadores em paralelo e potência firme como a potência que a SE possui quando o maior transformador é desconectado do sistema. A Figura 5 apresenta o arranjo de uma barra simples seccionada.

Uma possibilidade de se ter uma maior confiabilidade do que os modelos de arranjos anteriores é o arranjo de barra principal e transferência. Este arranjo possui disjuntores extraíveis, chaves seccionadoras e disjuntor que interliga os barramentos, denominado disjuntor de transferência. Em operação normal o barramento principal está energizado e o de transferência desenergizado, assim que acontecer uma falta no sistema, os disjuntores dos alimentadores e o disjuntor de transferência atuam, energizando o barramento de transferência. Qualquer disjuntor que interliga a barra principal e o alimentador pode ser retirado do serviço para manutenção e como um possível ponto fraco desse arranjo é que para manutenção na barra principal toda SE será desligada e assim os alimentadores ficarão sem energia. Para corrigir este problema utilizam-se um barramento adicional, denominado barramento de reserva (BOZZI, 2011). A Figura 6 mostra o diagrama unifilar deste tipo de arranjo.

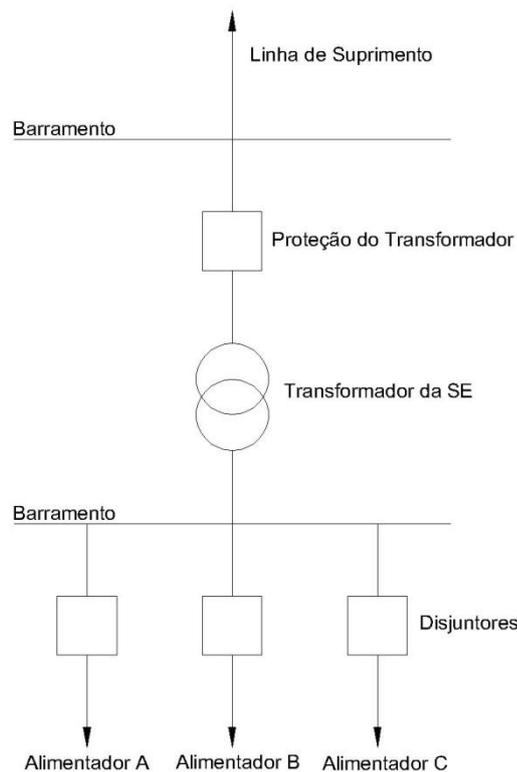


Figura 4 – Barra Simples de uma SE.

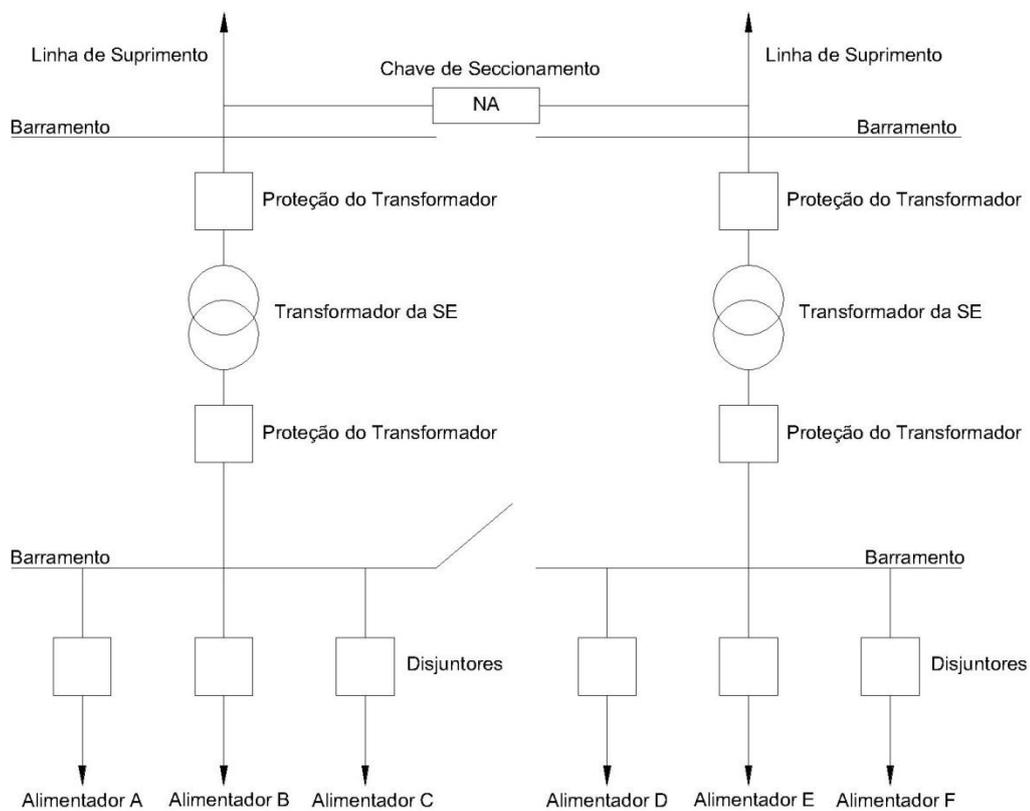


Figura 5 – Barra Simples Seccionada de uma SE.

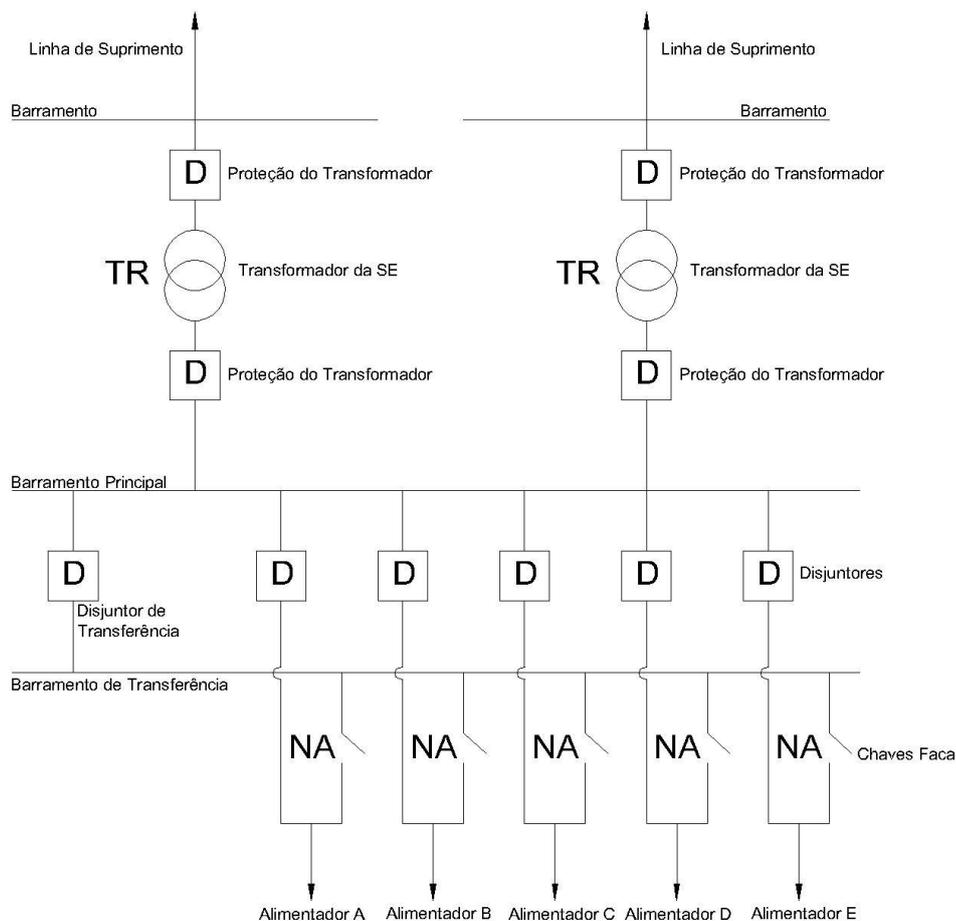


Figura 6 – Barra Principal e de Transferência de uma SE.

As redes de distribuição primárias, ou de média tensão (MT), são distribuídas a partir da SE de forma aérea ou subterrânea. Se o sistema for aéreo, a forma da estrutura é radial. Há a possibilidade de transferência de carga de um alimentador para o outro em caso de manutenção preventiva ou corretiva e também quando há uma falta em algum alimentador. Essas redes de MT atendem consumidores primários e os transformadores de distribuição. Os transformadores de distribuição são os responsáveis por abaixar a tensão ao nível de consumidores finais de baixa tensão (BT).

As redes aéreas são as mais difundidas no Brasil por possuir baixo custo e as redes subterrâneas possuem grande aplicação nos centros de grandes cidades ou em lugares onde há necessidade paisagística, como é o caso de condomínios fechados e da capital do Brasil, Brasília. Neste trabalho, tratar-se-á apenas da rede

aérea, dado que o sistema de distribuição da cidade de Formiga não possui rede subterrânea.

Os principais consumidores conectados ao sistema de distribuição primário são indústrias de médio porte e grandes centros comerciais. Os principais consumidores ligados na baixa tensão são as residências, iluminação pública, estabelecimentos comerciais e indústrias de pequeno porte.

As redes aéreas são constituídas de postes de concreto circular, duplo T e madeira tratada. O poste de concreto circular é mais utilizado em zona urbana, o poste de madeira é mais utilizado em zona rural e o poste duplo T é utilizado em zona urbana e rural. O poste duplo T está sendo bastante utilizado, pois possui custo inferior aos demais.

As estruturas conectadas aos postes se dividem em estruturas primária e secundária. A estrutura primária localiza-se no topo dos postes ou no primeiro nível onde se conecta as cruzetas que possuem um comprimento de cerca de dois metros e nas cruzetas são conectados os isoladores tipo pino ou disco. Hoje em dia, por causa da revolução tecnológica, as cruzetas estão sendo substituídas por estruturas compactas protegidas, são estruturas com custo maior, mas que possuem vantagens como a redução da taxa de falhas e por diminuir o espaçamento entre os cabos, estas estruturas podem ser utilizadas em lugares onde há arborização ou outros obstáculos onde a cruzeta não poderia ser utilizada.

As estruturas secundárias são conectadas no poste em nível inferior ao sistema primário, podem utilizar isoladores do tipo roldana, braço com grampo ou olhal para a conexão com o cabo de BT. A rede de BT pode operar de forma radial ou em malha, alcançando por circuito algumas centenas de metros. Como a rede de BT transporta cerca de kVA enquanto a MT transporta cerca de MVA, o sistema de BT não possui nenhum recurso quando há falta por demais motivos ou chaves que poderiam transferir a carga, o que acontece é que quando há alguma falta no sistema de BT os clientes entram em contato com a concessionária de energia elétrica e a única proteção no sistema de BT são os disjuntores instalados no padrão de entrada de cada consumidor.

A Figura 7 apresenta um poste de concreto circular com estrutura primária de cruzeta com isoladores tipo pino de 15 kV nas laterais e 34 kV na fase central,

estrutura secundária com afastador e isoladores do tipo roldana, transformador trifásico de 112,5 kVA e suas respectivas chaves fusíveis, com iluminação pública com luminária coberta e com ramais de clientes ligados na estrutura secundária.

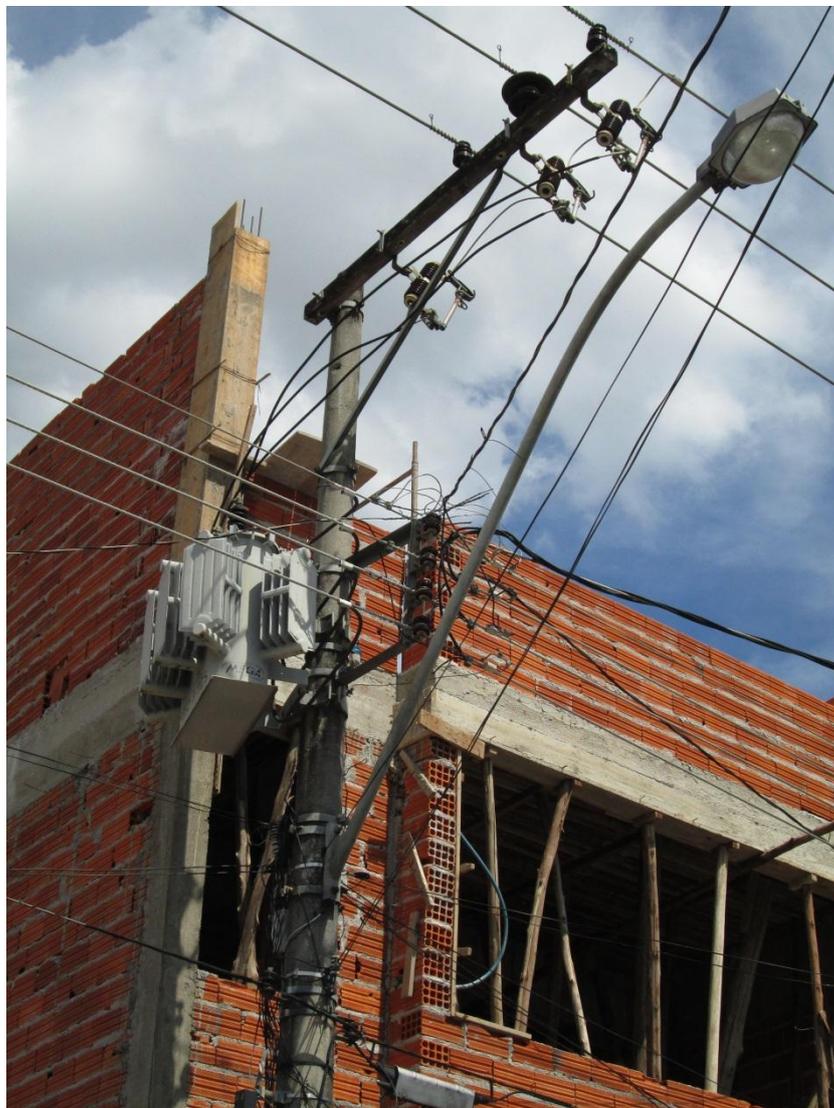


Figura 7 – Circuito primário, secundário e transformador.

Os cabos utilizados no sistema de distribuição podem ser de alumínio, aço ou cobre. Conforme as características da rede e a necessidade utilizam-se cabos nus, protegidos ou isolados. A definição de cada tipo é:

- Cabo nu: Sem nenhuma camada de proteção, rede convencional;
- Cabo protegido: Possuem uma capa de proteção que possui a função de proteger o cabo de algum contato acidental, por exemplo, galhos de

árvores sobre ação do vento, este cabo não garante a isolação do cabo;

- Cabo Isolado: Este cabo é composto por condutor metálico para transportar a energia, isolação para evitar o contato direto com pessoas, objetos ou com outro condutor energizado e proteção externa para proteger contra agentes químicos, penetração de umidade, danificação mecânica ou contra qualquer influencia que tende a prejudicar o funcionamento do cabo (KAGAN, 2010).

Os cabos podem ser do tipo:

- CA – Cabo de Alumínio;
- CAA – Cabo de Alumínio com Alma de Aço;
- 1N5 – Cabo de Aço Aluminizado.

O cabo CA é um condutor encordoado concêntrico composto de uma ou mais camadas helicoidais (coroas) de fios de alumínio, usualmente de mesmo diâmetro. De acordo com a aplicação o cabo CA pode ser encontrado em diversas faixas de temperatura e encordoamento (CELG, 2010).

O cabo CAA é de construção similar ao cabo CA, exceto pelo fato de que os cabos internos são formados por cabos de aço e os externos por cabos de alumínio. O cabo CAA é identificado pelo número de cabos de alumínio e aço, por exemplo, pode se ter um cabo CAA 30/7.

Segundo a Cemig (2002) na zona urbana utiliza-se cabo CA por terem vãos em média de 40 metros. Os cabos CAA são mais utilizados em redes de distribuição rural, por serem onde se encontram as redes com maiores vãos, mas o primeiro e o último vão de um novo ramal com 80 metros podem ser construídos com cabo CA. Acima de 80 metros utiliza-se cabo CAA para as fases e cabo de aço aluminizado para o condutor neutro segundo a Cemig (2012).

As bitolas do cabo convencional encontrado tanto nos sistemas de distribuição aéreo urbano como rural estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Seção dos condutores convencionais encontrados no Sistema de Distribuição.

AWG/MCM	Seção (mm ²)
4	21,14
2	33,64
1/0	53,55
2/0	67,40
3/0	85,00
4/0	107,22
336,4	170,46

Fonte: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas (2002, p. 1-8).

Os transformadores do sistema de distribuição, também chamados de estações transformadores (ET) segundo Kagan (2010), possuem como função transformar a MT do nível primário para BT do nível secundário. Possuem atualmente, chaves fusíveis instaladas na MT para proteger contra sobrecorrentes e para-raios na MT e BT para proteger contra sobretensões (Cemig, 2009). Nas redes aéreas os transformadores são instalados nos postes, as potências padronizadas pela Cemig para os transformadores estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Transformadores padronizados pela Cemig.

Tipo de Transformador	Potência Nominal (kVA)
Monofásico	5 – 10 – 15 – 25 – 37,5
Trifásico	30 – 45 – 75 – 112,5 – 150 – 225 – 300

Fonte: Transformadores para Redes de Distribuição Aéreas 15 kV, 24,2 kV, e 36,2 kV (2002, p. 10).

2.2. REPOTENCIAÇÃO

A Repotenciação é um método utilizado para aumentar a capacidade de transporte de energia elétrica, evitando a necessidade de construir novas linhas. Esta proposta é bastante utilizada em sistemas de transmissão de energia porque

aproveita as LT's existentes com faixa de servidão já determinada, além de não precisar adquirir novas faixas e evitar o demorado licenciamento ambiental. Como é o caso dos trabalhos de Biasotto (2009), (COSTA et al., 2002), (DUTRA et al., 2005) e Oliveira (2010).

Dentre as técnicas de repotencialização utilizadas, citam-se:

- Alteração do limite térmico;
- Recondutoramento;
- Elevação da tensão operativa.

O limite térmico de qualquer linha de distribuição é determinado pela máxima corrente que de acordo com a bitola da linha, tem-se a máxima temperatura que o cabo suporta. A temperatura do cabo sofre influência pelas condições ambientais como a temperatura ambiente e o vento. Essas influências podem causar tanto redução quanto aumento na máxima corrente elétrica transportada pela linha (Oliveira, 2000). Esta técnica de repotenciação não irá ser utilizada neste trabalho, porque o sistema de distribuição é muito extenso e seria inviável, para o escopo do presente trabalho, ter um estudo detalhado de vento e temperatura de todo o sistema de distribuição, além disso, a demanda de energia do sistema de distribuição varia ao longo do dia.

A técnica de recondutoramento consiste em substituir os condutores antigos por novos condutores que consigam transportar maior quantidade de corrente elétrica. Também leva em consideração que os novos condutores sejam capazes de manter as condições mecânicas dos antigos para evitar reforços de estruturas ou até troca de postes. Existem várias técnicas de recondutoramento como citados por Silva e Baumann (1997) e Oliveira (2000). Está técnica será analisada neste trabalho, porque dependendo das condições que os alimentadores da SE de Formiga estiverem, será analisada a questão de recondutorar toda a linha do alimentador ou dependendo do custo e da linha existente, apenas uma parte da rede tronco ou a rede tronco inteira de cada alimentador ou parte dele para que neste percorra uma maior quantidade de energia elétrica.

A elevação da tensão operativa da linha possui como função elevar o nível de tensão da linha sem precisar trocar os condutores. Este é um procedimento que causaria muitas mudanças no sistema, como forma de todos os equipamentos e

isolamentos da linha e da SE suportar um aumento do nível de tensão, ocorrendo trocas de equipamentos e isolação. Para linhas de transmissão os custos utilizando esta técnica ficam em torno de 15% a 20% de uma linha de transmissão nova (Oliveira, 2000). O mesmo não ocorre para o sistema de distribuição, o sistema de distribuição de Formiga trabalha com tensão de MT em 13,8 kV, e sendo assim, todos os transformadores estão padronizados para níveis de MT em 13,8 kV e nível de BT 220/127 V e também a maioria dos isoladores tipo pino e disco de Formiga são isoladores de 15 kV. Se caso aumenta-se a MT para 34,5 kV, teria que substituir os transformadores, os isoladores, os equipamentos de proteção e coordenação e as estruturas existentes, pois as mesmas são para 15 kV, as estruturas para 34,5 kV requerem espaçamentos diferentes. Isto faz com que os gastos para este procedimento fique muito caro e fora de questão, pois só o alimentador três da subestação de Formiga que está sendo percorrido possui mais de 1000 transformadores conectados.

2.3. PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS

Um dos procedimentos que podem ser considerados é a construção de novos alimentadores saindo da própria SE de Formiga. Para isto, o transformador da SE deverá ser analisado, se suportar esse acréscimo de carga, pode ocorrer duas situações de construção de alimentadores:

- Para conectar em concentrações de cargas do alimentador que estiver trabalhando com sobrecarga;
- Para conectar áreas onde há exigência de novas concentrações de cargas.

Em relação à primeira situação, todo sistema de distribuição já possui chaves normalmente abertas que quando operadas em situações de contingência, interligam um alimentador a outros alimentadores da SE ou, até mesmo, conectam a um alimentador de uma SE diferente. Mas essas chaves são normalmente utilizadas para quando há falta ou se for realizar alguma manutenção preventiva ou corretiva para diminuir o número de consumidores sem energia elétrica. Este novo

alimentador conectará de forma definitiva as concentrações de carga do alimentador que esteja trabalhando em sobrecarga. Desta forma, todos os alimentadores trabalharão em condições normais de operação.

A segunda proposta é que os alimentadores existentes já estejam com consumidores no limite e se fosse para aumentar mais carga em sua linha iriam trabalhar em sobrecarga e, para não trabalharem com sobrecarga, seriam construídos mais alimentadores para suprir este aumento de demanda.

Após análise do transformador da SE de Formiga, se constatar que o mesmo esteja operando em sobrecarga ou que esteja trabalhando em seu limite total. As medidas cabíveis seria a de trocar o transformador da SE ou construir uma nova SE em Formiga. Com a possível troca do transformador da SE, devem ser levantadas questões como a potência do transformador existente e a potência do transformador futuro, os tipos de proteção que este transformador requer a vida útil e principalmente o tamanho, pois a SE de Formiga possui uma pequena área e dependendo do tamanho do transformador será melhor construir uma nova SE com este novo transformador.

A construção de uma nova SE requer um estudo detalhado, para a localização, tipos de equipamentos de proteção, manobra e controle da SE. Esta opção precisará de um enorme investimento em projeto e construção. E também um estudo terá que ser levantado para ver qual o alimentador será desativado da antiga SE para que o transformador da antiga SE trabalhe em condições normais e não perca vida útil dos seus equipamentos por trabalhar em sobrecarga.

Alguns trabalhos nessas áreas já foram estudados como o caso do planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão de Cossi (2008), que consiste de uma metodologia em três etapas: a primeira em relação ao balanço das três fases do circuito, a segunda em relação a localização da maior concentração da capacidade e quantidade de transformadores abaixadores, onde estiver a maior concentração de carga, e a terceira fase que consiste em análise do tipo de cabo dos alimentadores.

O trabalho realizado por Oliveira (2011) também merece destaque, pois trata de reconfiguração de alimentadores para minimizar as perdas de potência ativa do

sistema sujeito à restrições físicas e operacionais do sistema de distribuição a partir de algoritmos *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP).

E por último o trabalho realizado por Almeida (2003) que trata de um novo modelo de estimador dos estados dos alimentadores radiais, baseados no algoritmo de fluxo de carga de soma das potências. O método faz a estimação partindo da SE para os ramais.

A maioria dos trabalhos atuais estão voltados para o sistema de geração e transmissão. Isto ocorre porque se o sistema de geração e transmissão falhar, milhões de consumidores ficarão sem energia, enquanto que se o sistema de distribuição falhar, somente alguns milhares ou centenas de consumidores ficarão sem energia. Associado a esta questão também está a pequena quantidade de dados de medição em tempo real do sistema de distribuição obtidos, a maioria das medições no sistema de distribuição ocorrem medindo o valor de corrente de forma discreta na saída dos barramentos de MT das SE's.

3. ESTRUTURA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A análise da condição de sobrecarga do transformador da SE e o estudo de repotenciação da linha de distribuição dos alimentadores da SE de Formiga, necessitam de levantamento de dados reais do sistema de distribuição. Como os alimentadores possuem longos quilômetros de distância, ficou definido realizar um levantamento de campo pelo alimentador três para definir as reais condições e características deste alimentador.

O levantamento de campo é uma etapa importante para o processo, pois existe no sistema de distribuição redes com estruturas antigas que podem estar em desgaste por tempo de uso ou intempéries e redes com estruturas novas que dependendo do tipo do processo a ser aplicado não necessita de nenhuma modificação.

Para a análise da possível sobrecarga dos transformadores da SE, o primeiro levantamento de campo foi utilizado para definir a quantidade, a potência e as fases conectadas nos transformadores, para realizar a média de potência em cada fase do alimentador da SE. Este tipo de levantamento foi realizado em área urbana e rural.

O primeiro levantamento de campo foi realizado através de inspeção visual terrestre, que consiste em obter informações dos postes, estruturas de MT (cruzetas e isoladores de pino ou de disco), transformadores, estais e afastadores de rede de BT.

O levantamento iniciou-se na SE de Formiga buscando todas as informações sobre a linha de subtransmissão conectada à SE, sobre a estrutura da SE e sobre a saída dos cinco alimentadores da SE.

Para a repotenciação, dependendo do método a ser utilizado, é importante saber o tipo de estrutura encontrada no sistema. Se a estrutura possui cruzeta, e se a cruzeta suportaria um novo cabo com bitola maior. Quais os tipos de isoladores e seu estado, quais as distâncias entre os condutores, qual o nível de operação dos transformadores conectados nos alimentadores e quais as alturas e resistências dos postes. Sendo assim, foi realizado o segundo levantamento de campo para mapear

as estruturas encontradas de MT. Por causa da extensão do alimentador três, este levantamento foi realizado somente em área urbana e 4 km de área rural.

3.1. SUBESTAÇÃO

A SE de Formiga está situada na Rua Hermínio Pio da Silva no bairro Ouro Negro. Esta SE recebe energia elétrica de uma derivação de linha de subtransmissão de 69 kV oriunda da SE de Arcos/MG, essa linha de subtransmissão termina na SE de Formiga. A SE de Formiga, SE de Arcos, a linha de subtransmissão e toda a extensão do sistema de distribuição de Formiga pertence a Cemig. Atualmente a empresa terceirizada Engelmig realiza toda manutenção preventiva e corretiva do sistema de distribuição de Formiga, enquanto que a linha de subtransmissão e as SE's, a própria Cemig é responsável pela manutenção preventiva e corretiva.

O sistema de energia elétrica do Brasil é interligado, por isso a energia consumida na cidade de Formiga pode ter sido gerada na usina hidrelétrica de Furnas, usina que se encontra mais próxima, ou pode ter sido gerada em outras usinas.

A Figura 8 apresenta a chegada da linha de subtransmissão de 69 kV na SE de Formiga. Observa-se que esta linha possui 10 isoladores poliméricos de 15 kV, totalizando uma isolação de 150 kV, o que significa que a linha já está com as isolações preparadas para um possível aumento de nível de tensão de transmissão para 138 kV.

Por questões burocráticas, não foi possível obter detalhes dentro da SE de Formiga. A única informação é em relação a quantidade e potência dos transformadores abaixadores, a quantidade dos alimentadores e a chave de aterramento.

Existem dois transformadores de potência de 12,5 MVA trabalhando em paralelo que tem por função abaixar o nível de tensão de 69 kV para 13,8 kV.



Figura 8 – Entrada da linha de subtransmissão na SE de Formiga.

A distribuição de energia é realizada através de cinco alimentadores que distribuem energia elétrica para a zona urbana e rural de Formiga e algumas cidades vizinhas. Os alimentadores são denominados:

- FMA 03;
- FMA 04;
- FMA 05;
- FMA 06;
- FMA 07.

A Figura 9 mostra a saída dos cinco alimentadores da SE de Formiga, o primeiro alimentador da esquerda é o FMA 03, ao lado está FMA 04, depois FMA 05, FMA 06 e FMA 07.



Figura 9 – Saída dos cinco alimentadores da SE de Formiga.

Todos os cinco alimentadores possuem chave faca normalmente fechada de 630 A na saída da subestação. O valor de 630 A é definido para sistema trifásico, quando o sistema é monofásico a chave faca a ser utilizada é a de 300 A (CEMIG, 2012). A chave faca é uma chave de manobra/interrupção que pode ser utilizada para manutenção corretiva e preventiva, para diminuir os lugares quando houver distúrbios na rede ou para conectar um alimentador em outro, ou seja, para interromper ou alterar o fluxo de potência. Esse tipo de chave é encontrado por todo circuito de distribuição de Formiga. A função das chaves faca utilizadas na saída de cada alimentador é para abrir o circuito e desligar o alimentador inteiro para uma manutenção preventiva ou corretiva dentro da SE. A Figura 10 mostra a chave faca normalmente fechada na saída da SE.



Figura 10 – Chave Faca 630 A na saída do FMA 03.

Todo equipamento do sistema de distribuição da Cemig é aterrado, incluindo a chave faca. Através do levantamento de campo no entorno da SE pode ser realizado um *croqui* do sistema elétrico da saída da SE, Figura 52 do Anexo A. Todas as chaves faca estão conectadas em estruturas primárias de ancoragem, como a N4, N3, HTE, CE4 e CEM4, como apresenta as Figura 26, Figura 27, Figura 41 e Figura 47. A seção 3.1.4 especificará cada tipo de estrutura encontrada no levantamento de campo do sistema de distribuição de Formiga. Os cabos de MT e o neutro que saem dos cinco alimentadores estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Cabos na saída dos cinco alimentadores.

Alimentador	Cabo no Primário	Neutro
FMA 3	3#336,4 – CAA	4/0 – CA.
FMA 4	3#336,4 – CA	1/0 – CA
FMA 5	3#4/0 – CAA	4/0 – CA
FMA 6	3#336,4 – CAA	4/0 – CA
FMA 7	3#150+9,5 – PROT.	1/0 – CA

Na saída de todos os alimentadores existe o conjunto de equipamentos de medição. Este tipo de equipamento é utilizado para as saídas dos alimentadores em SE's e para clientes ligados em MT. As estruturas onde instala-se este conjunto de equipamentos está padronizada com poste de no mínimo 11 metros de altura e 300 daN de resistência, de preferência com poste de concreto com seção circular. A carcaça deste equipamento tem que ser aterrada e conectada ao cabo neutro (CEMIG, 2012b).

Este tipo de equipamento possui um transformador de potencial e um transformador de corrente, para diminuir os níveis de tensão e corrente da rede para o padrão de corrente e tensão de equipamentos de medição e desta forma medir a potência consumida pelo alimentador ou cliente de MT. Na SE de Formiga existe um conjunto de medição conectada a cada alimentador. A Tabela 7 mostra o tipo, altura e resistência do poste e a estrutura de MT onde foi instalado o conjunto de medição na SE de Formiga.

Tabela 7 – Estrutura de conexão do conjunto de medição.

Alimentador	Tipo do Poste	Altura Poste (m)	Resistência (daN)	Estrutura MT
FMA 03	Seção Circular	11	300	N4
FMA 04	Seção Circular	11	300	N4
FMA 05	Seção Circular	11	600	N4
FMA 06	Seção Circular	11	300	N4
FMA 07	Seção Circular	11	600	N4

A partir da Tabela 7 constata-se que todos os postes são de concreto de seção circular e através do levantamento de campo observa-se o acréscimo de chave faca normalmente aberta em paralelo com o conjunto de medição.

A Figura 11 mostra a instalação do conjunto de medição na saída da SE de Formiga em paralelo com a chave faca normalmente aberta. Este conjunto de medição está conectado ao alimentador FMA 07.



Figura 11 – Conjunto de medição na saída da SE.

Uma das formas de proteção da SE de Formiga é a chave de aterramento, esta chave possui como princípio de funcionamento a realização de um curto-circuito fase/terra manual, assim toda a corrente escoará para a terra, a proteção da SE de Arcos/MG sensibilizará, enviando um sinal de abertura ao disjuntor da mesma SE, desenergizando a SE de Formiga. No caso da SE de Formiga e de algumas SE's existe esse tipo de chave, no entanto, essa proteção não é utilizada no projeto de novas SE's, pois no momento em que há o curto-circuito fase/terra, os equipamentos

passam por um grande *stress*, resultando em desgaste desnecessário dos componentes da rede de distribuição.

A partir do levantamento de campo (croqui), pode ser realizado o diagrama unifilar da SE de Formiga. Como apresenta a Figura 12, a tipologia do diagrama unifilar da SE é barra simples com dois transformadores em paralelo e cinco alimentadores. Essa tipologia é a mais simples e possui o menor custo de instalação entre as topologias de SE, mas conta com um transformador em paralelo para garantir uma maior confiabilidade do sistema, desta forma, quando um transformador parar o outro continuará fornecendo energia (KAGAN, 2010). Observa-se que qualquer defeito ocorrido na rede de subtransmissão de 69 kV acarreta na falta de energia para toda a cidade de Formiga.

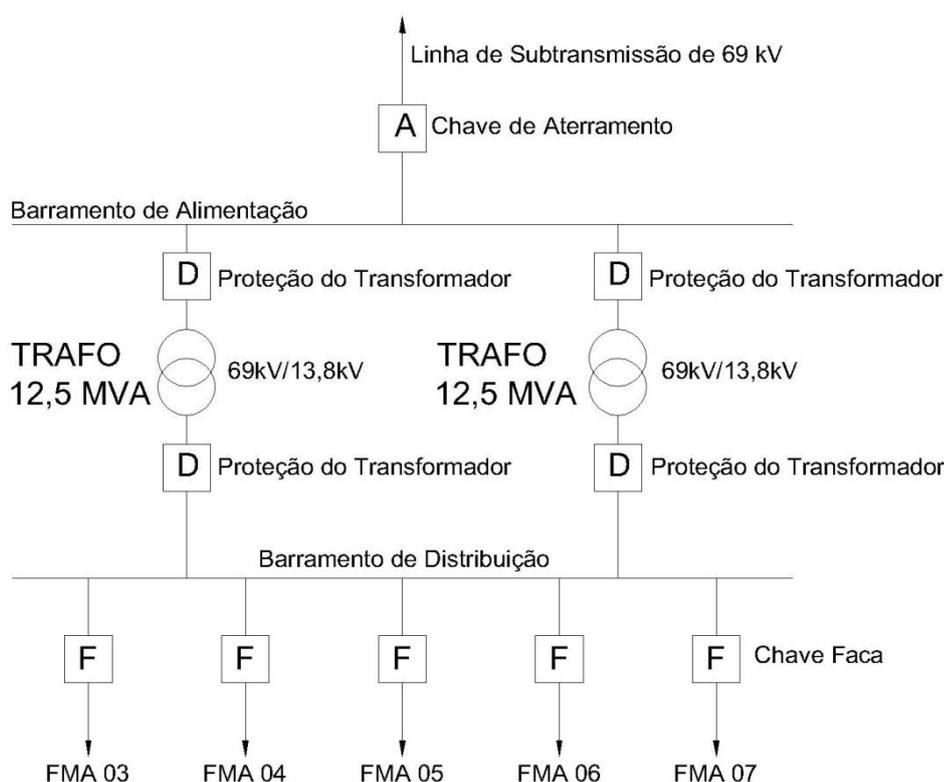


Figura 12 – Diagrama unifilar da SE de Formiga.

Através do diagrama unifilar, define-se a potência instalada da SE como sendo a soma dos dois transformadores em paralelo, totalizando 25 MVA. A potência firme como 12,5 MVA. Retirando qualquer um dos transformadores a

potência firme será a mesma porque os dois transformadores possuem o mesmo valor nominal (KAGAN, 2010).

3.2. POSTES

Os postes encontrados no sistema de distribuição de Formiga foram de concreto de seção circular, concreto duplo T ou poste de madeira de eucalipto tratada. Os postes utilizados na zona urbana são de madeira ou concreto duplo T, os postes de concreto circular são utilizados nos casos em que tecnicamente não foi possível a utilização dos outros dois tipos (CEMIG, 2005). Na zona rural utiliza-se o poste de concreto duplo T e o de madeira (CEMIG, 1985). Somente é utilizado poste de madeira em zona rural em localidades de difícil acesso, pois o poste de concreto duplo T pode trincar ou sofrer danos devido ao transporte durante o percurso.

Os postes são classificados em relação a sua altura (m) e resistência mecânica (daN). As Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 apresentam os tipos de postes de concreto circular, madeira e duplo T, respectivamente, encontrados no sistema de distribuição.

Os postes de 9 m eram utilizados para redes secundárias sem previsão para ampliação de rede primária.

Os postes de 10 m eram utilizados para rede primária e secundária convencional ou isolada, para rede protegida em caso de rede existente e instalação de para-raios em rede convencional.

Os postes de 9 e 10 m foram despadronizados pela Cemig, hoje a altura mínima do poste a ser instalado é 11 m. Os postes de 11 m antigamente eram utilizados para rede primária protegida com rede secundária e instalação de equipamentos, hoje em dia, além dessa função, os postes de 11 m são utilizados para as funções dos antigos postes de 9 e 10 m.

Os postes iguais ou maiores a 12 m são utilizados em casos especiais, como para travessias de rodovias, linhas férreas ou rios, para circuitos múltiplos primários e em projetos específicos de iluminação pública, como por exemplo, iluminação de rodovias (CEMIG, 2005).

Tabela 8 – Tipos de poste de concreto circular.

Concreto Circular	
Altura (m)	Resistência (daN)
9	150
	300
10	150
	300
	600
11	300
	600
	1000
12	300
	600
	1000
13	600
	1000

Fonte: Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas (2005, p. 13-8).

Tabela 9 – Tipos de poste de madeira.

Madeira	
Altura (m)	Resistência (daN)
9	150
	300
	600
10	150
	300
	600
11	300
	600
12	300
	600
13	300
	600
15	300
	600
18	600

Fonte: Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas (2005, p. 13-8).

Tabela 10 – Tipos de poste duplo T.

Altura (m)	Resistência Face A (daN)	Resistência Face B (daN)
9	75	150
	150	300
	300	600
10	75	150
	150	300
	300	600
11	150	300
	300	600
12	150	300
	300	600
13	150	300
	300	600
15	300	600
18	300	600

Fonte: Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas (2005, p. 13-9).

Enquanto os postes de madeira e concreto de seção circular apresentam forma física arredondada, os postes de concreto duplo T possuem dois lados, sendo assim, devido a sua assimetria na distribuição de esforços, o lado de menor resistência suporta apenas 50% de sua carga nominal. O lado de menor resistência é o lado que possui o maior comprimento.

O poste duplo T é instalado com o lado de menor resistência voltado para a direção da rede, quando não houver ângulo de deflexão. Quando houver ângulo de deflexão menor que 60°, o poste é instalado com o lado de maior resistência voltado para a direção da bissetriz do ângulo formado pelos condutores. Para ângulos entre 60 e 90° o poste duplo T fica com o lado de maior resistência voltado para o sentido do maior vão, ou seja, voltado para o vão que requer maior esforço (CEMIG, 2012).

Os postes na zona urbana estão locados na maioria dos casos na divisa dos lotes. Quando não estão locados na divisa dos lotes, estão locados no meio dos

lotes. Esta locação previne que postes não sejam instalados em frente de garagem, janela, portão, sacadas, etc.

A locação dos postes em zona urbana é sempre no lado Oeste, se o eixo da rua estiver no sentido Norte-Sul ou a locação é no lado Norte, se o eixo da rua estiver no sentido Leste-Oeste.

O esforço do poste no sistema de distribuição tem que ser capaz de suportar as cargas devido às redes primárias, secundária, ramais de ligação e outros cabos de uso mútuo, por exemplo, cabo da Oi e de tv a cabo.

Todo tipo de poste possui identificação. Nos postes de madeira os dados são colocados em uma placa que é fixada no poste. Nos postes de concreto os dados são concretados na fabricação do poste. Os dados que os postes possuem são:

- Fabricante;
- Ano de Fabricação;
- Altura;
- Resistência.

A Figura 13 mostra os dados de um poste duplo T, cujo fabricante é Aprl, ano de fabricação foi em 18/02/1994, sua altura é de 10 m e sua resistência de 150 daN.

A Figura 14 apresenta o poste de seção circular. A Figura 15 apresenta o poste de madeira. A Figura 16 apresenta o poste duplo T.



Figura 13 – Identificação de poste.



Figura 14 – Poste de Seção Circular.



Figura 15 – Poste de Madeira.



Figura 16 – Poste Duplo T.

3.3. ESTRUTURA PRIMÁRIA

As estruturas primárias podem ser monofásicas ou trifásicas, e do tipo convencional, rede compacta ou isolada com Nível Básico de Isolamento (NBI) determinado para cada tipo de estrutura.

As estruturas convencionais são as que possuem cruzeta e isoladores de pino, são utilizadas para cabos convencionais (nus). Este tipo de estrutura é o mais antigo e é bastante encontrado em todos os circuitos de distribuição de energia do Brasil. A Cemig despadronizou este tipo de estrutura para as zonas urbanas, em qualquer construção nova em perímetro urbano utilizam-se as estruturas compactas ou isoladas.

As estruturas compactas são redes que não possuem cruzeta, este tipo de rede possui um menor espaçamento entre os condutores. Os cabos desta rede possui proteção de material polimérico, denominando-se cabo protegido. O cabo protegido não é isolante, mas permite uma redução da corrente de fuga em caso de contato acidental do cabo com objetos aterrados.

As redes compactas são utilizadas em áreas urbanas tipicamente residenciais ou comerciais, áreas tipicamente agrícolas, distritos industriais com baixa densidade de fábricas e expostas a ventos e chuvas regulares com atmosfera tipicamente não poluída. Para áreas secas que possuem areia em suspensão na atmosfera e áreas bastante poluídas que possuem agentes poluentes e condutivos em suspensão na atmosfera, por exemplo, o minério de ferro, pó de cimento, fosfatos, etc..., as redes compactas podem ser utilizadas, mas deve haver limpeza dos componentes da rede em períodos inferiores há dois anos (CEMIG, 2012a).

As estruturas isoladas são redes preparadas para suportar cabos pesados, geralmente as estruturas isoladas são muito utilizadas no sistema de distribuição para redes de baixa tensão, rede de posto particular e em redes subterrâneas. Neste trabalho este tipo de estrutura não será tratado, pois a cidade de Formiga é composta principalmente por estruturas convencionais e compactas.

Os postes de madeira para zona rural com estais rebaixados ou com maior isolamento da fase central, utilizam por estrutura primária, três isoladores de disco ou um isolador polimérico de 36,2 kV. O NBI deste tipo de estrutura será de 300 kV.

Isto ocorre devido às propriedades dielétricas da madeira que possui um melhor nível de isolamento (CEMIG, 2012).

Em estruturas fim de rede com poste duplo T, sem estais longitudinais, o lado de maior resistência do poste fica voltado para a direção da rede. Se possuir estais longitudinais, tanto para rede monofásica e trifásica o lado de menor resistência do poste deve ser voltado para a direção da rede (CEMIG, 2012).

As estruturas N3, N4 e TE é limitada para condutores CAA até 1/0 AWG, tendo-se em vista a resistência mecânica das cruzetas. E as estruturas HT e HTE que possuem condutores CAA 4/0 AWG ou 336,4 MCM, devem possuir resistência mínima de poste de 300 daN e se forem estruturas fim de rede o poste deve ser de no mínimo 600 daN (CEMIG, 2012).

As estruturas encontradas pelo levantamento de campo e utilizadas na técnica de recondução estão detalhadas a seguir em relação à quantidade de fases, tipo de estrutura, função e detalhes técnicos.

3.3.1. ESTRUTURA TIPO “U”

Estrutura monofásica convencional utilizada em área rural e urbana. Este tipo de estrutura não possui cruzeta e é formada por isoladores tipo pino de topo. A fase está conectada na estrutura primária e o neutro na secundária. As estruturas tipo U encontradas pelo levantamento de campo são: U1, U2, U3, U4 e U3.2. Os cinco tipos podem ter cabo de aterramento, os aterramentos nos postes dependem da estrutura da rede. Dependendo do tipo de esforço dos cabos em postes com estrutura U, todos os tipos de estruturas podem possuir estais laterais e longitudinais adicionais.

A Tabela 11 apresenta as características principais dos tipos de estruturas U encontradas pelo levantamento. A Figura 17 apresenta a estrutura U1 com NBI de 170 kV e a Figura 18 mostra a U1 com NBI de 300 kV.

A Figura 19 apresenta a estrutura U2 com NBI de 95 kV. A Figura 20 apresenta a estrutura U4 com NBI de 95 kV. A Figura 21 apresenta a estrutura U3.2 com NBI de 95 kV.

Tabela 11 – Características das estruturas tipo U.

Estrutura	Utilização	Isolador	Níveis de NBI
U1	Rede tangente	Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV
U2	Rede com ângulo ou fim de rede	Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV
U3	Derivação ou fim de rede	Disco	170 kV ou 300 kV
U4	Rede com ângulo	Disco e Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV
U3.2	Derivação	Disco e Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV



Figura 17 – Estrutura U1 com NBI de 170 kV.



Figura 18 – Estrutura U1 com NBI de 300 kV.



Figura 19 – Estrutura U2 meio de rede com NBI de 95 kV.

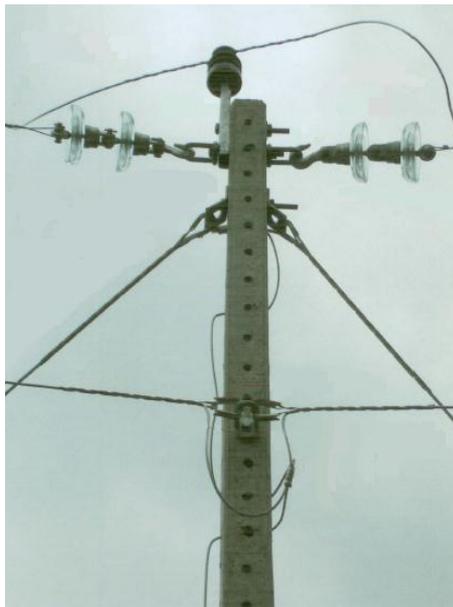


Figura 20 – Estrutura U4 utilizada no rural com NBI de 95 kV.



Figura 21 – Estrutura U3.2 em zona urbana.

3.3.2. ESTRUTURA TIPO “N”

Estrutura trifásica convencional utilizada em área rural e urbana. Possui maior aplicação em área rural, pois sua funcionalidade é para ser utilizada quando existir vãos longos, mas também é aplicada em área urbana em longas avenidas. Esta estrutura possui cruzeta de madeira, pinos de cruzeta, isoladores de pino no topo do poste e isoladores de roldana para o neutro. As três fases estão conectadas na estrutura primária do poste e o neutro na estrutura secundária. As estruturas tipo N encontradas pelo levantamento de campo são dos tipos: N1, N2, N3 e N4. Os quatro tipos podem ter cabo de aterramento, os aterramentos nos postes dependem da

estrutura da rede. Dependendo do tipo de esforço dos cabos em postes com estrutura N, todos os quatro tipos de estruturas podem possuir estais laterais e longitudinais adicionais.

A Tabela 12 apresenta as características principais dos tipos de estruturas N. A Figura 22 apresenta a estrutura N1 com NBI de 300 kV. As Figuras 23 e 24 apresentam a vista frontal e de topo da estrutura N2 com NBI de 170 kV. As Figuras 25 e 26 apresentam a vista frontal e de topo da estrutura N3 com NBI de 170 kV. A Figura 27 apresenta a estrutura N4 com NBI de 170 kV.

Tabela 12 – Características das estruturas tipo N.

Estrutura	Utilização	Isolador	Níveis de NBI
N1	Rede tangente	Pino	170 kV ou 300 kV
N2	Rede com ângulo ou fim de rede	Pino	170 kV ou 300 kV
N3	Derivação ou fim de rede	Disco	170 kV ou 300 kV
N4	Rede com ângulo	Disco e Pino	170 kV ou 300 kV



Figura 22 – Estrutura N1 em poste de madeira, NBI 300 kV.

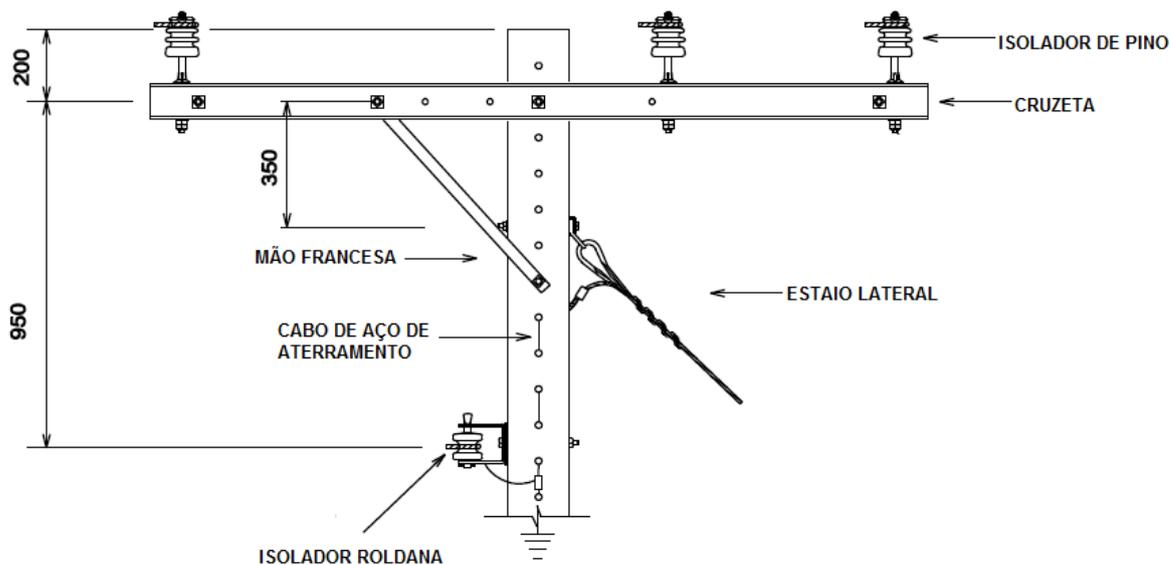


Figura 23 – Estrutura N2 de NBI 170 kV, vista frontal.

Fonte: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais (2012, p. 5-3).

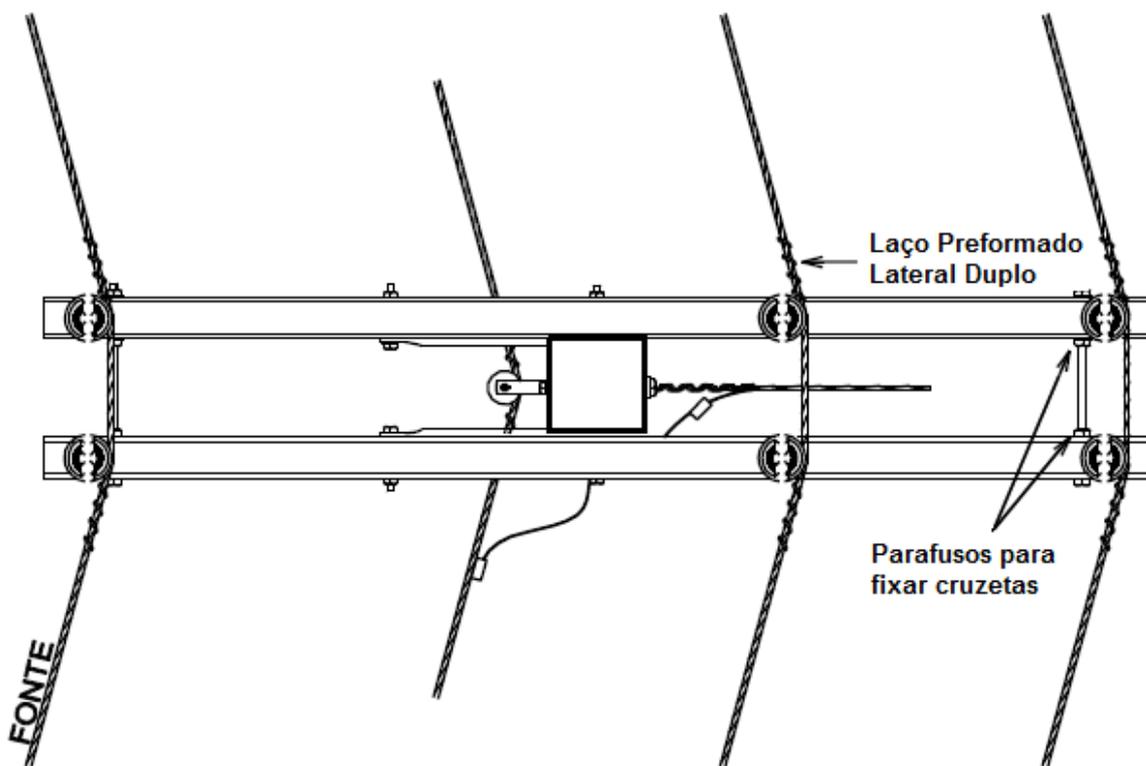


Figura 24 – Estrutura N2 de NBI 170 kV, vista de topo.

Fonte: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais (2012, p. 5-3).

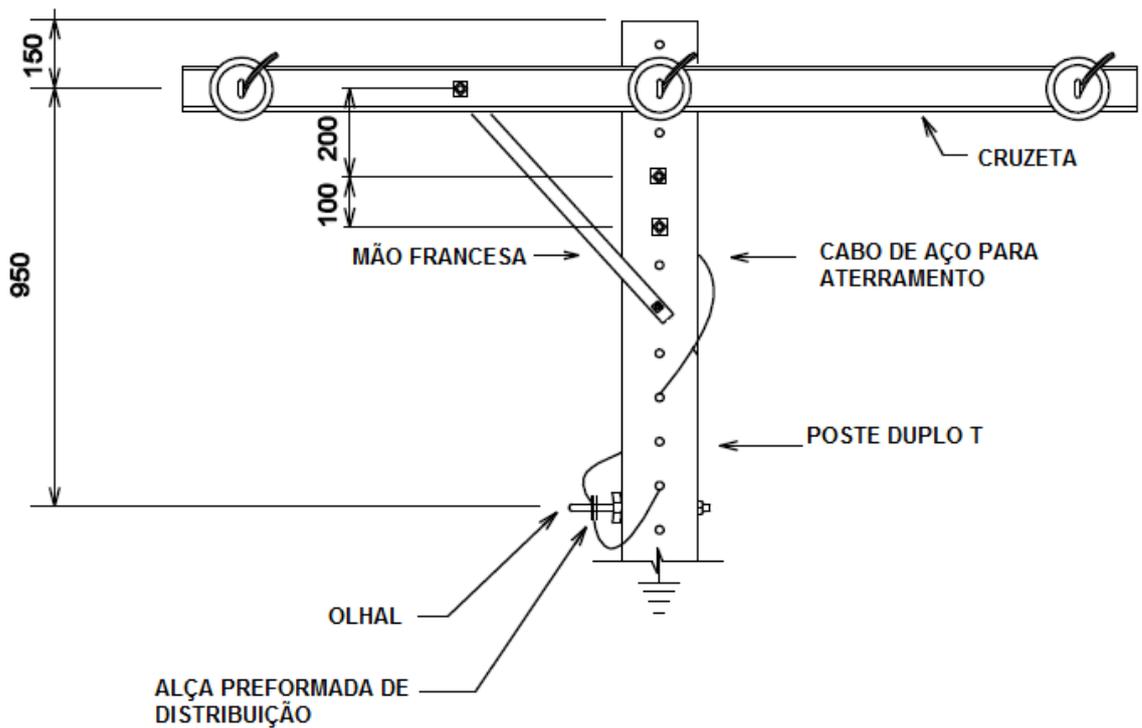


Figura 25 – Estrutura N3 de NBI 170 kV, vista frontal.

Fonte: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais (2012, p. 5-5).

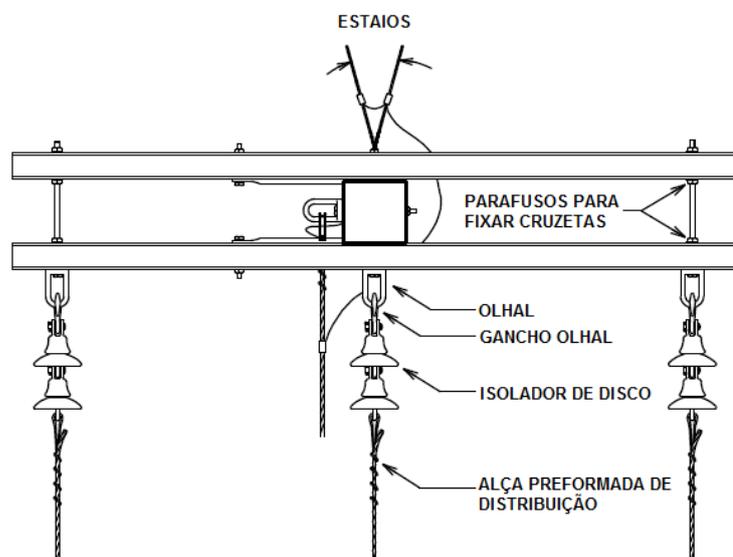


Figura 26 – Estrutura N3 de NBI 170 kV, vista de topo.

Fonte: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais (2012, p. 5-5).

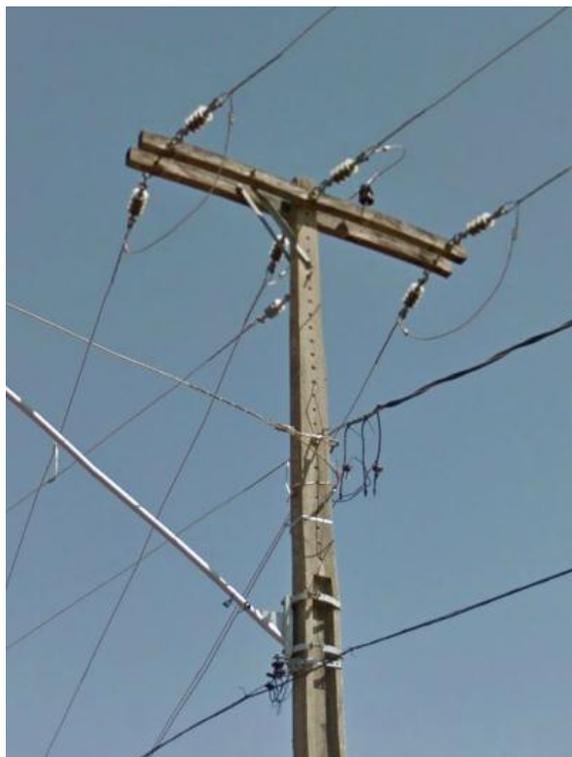


Figura 27 – Estrutura N4 de NBI 170 kV.

3.3.3. ESTRUTURA TIPO “M”

Estruturas trifásicas convencionais utilizadas em área urbana, denominada estrutura de meio beco, possui NBI de 95 kV, 170 kV ou 300 kV. Estas estruturas são utilizadas em rede tangente ou com ângulo. As três fases estão conectadas na estrutura primária do poste e o neutro na estrutura secundária. As estruturas encontradas pelo levantamento de campo foram de quatro tipos: M1, M2, M3 e M4. Os quatro tipos podem ter cabo de aterramento, os aterramentos nos postes dependem da estrutura da rede. A estrutura M com NBI de 95 kV está despadronizada, em toda construção nova a estrutura M a ser utilizada é de 170 kV ou 300 kV.

A Tabela 13 apresenta as características principais dos tipos de estruturas M. A Figura 28 apresenta a estrutura M1 com NBI de 170 kV. A Figura 29 apresenta a estrutura M2 com NBI de 95 kV e transformador. A Figura 30 apresenta a estrutura

M3 com NBI de 170 kV. A Figura 31 apresenta a estrutura M4 com NBI de 170 kV e chave faca aberta.

Tabela 13 – Características das estruturas tipo M.

Estrutura	Utilização	Isolador	Níveis de NBI
M1	Rede tangente	Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV
M2	Rede com ângulo ou fim de rede	Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV
M3	Derivação ou fim de rede	Disco	95 kV, 170 kV, 300 kV
M4	Rede com ângulo	Disco e Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV



Figura 28 – Estrutura M1 de NBI 170 kV.



Figura 29 – Estrutura M2 de NBI 95 kV e transformador.

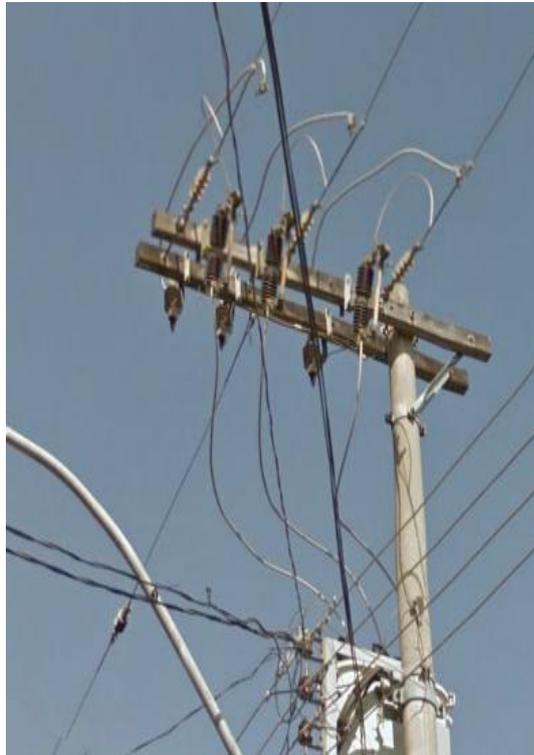


Figura 30 – Estrutura M3 de NBI 170 kV.



Figura 31 – Estrutura M4 de NBI 170 kV e chave faca aberta.

3.3.4. ESTRUTURA TIPO “B”

Estruturas trifásicas convencionais utilizadas em área urbana, denominada estrutura beco, possui NBI de 95 kV, 170 kV ou 300 kV. Estas estruturas são utilizadas em rede tangente ou com ângulo com finalidade de afastar a rede de MT. As três fases estão conectadas na estrutura primária do poste e o neutro na estrutura secundária. Esta estrutura pode ser de quatro tipos: B1, B2, B3 e B4. Os quatro tipos podem ter cabo de aterramento, os aterramentos nos postes dependem da estrutura da rede. A estrutura B com NBI de 95 kV está despadronizada, em toda construção nova a estrutura B a ser utilizada é de 170 kV ou 300 kV.

A Tabela 14 apresenta as características principais dos tipos de estruturas B. A Figura 32 apresenta a estrutura B1 com NBI de 170 kV. A Figura 33 apresenta a estrutura B2 para cabo protegido. As Figuras 34 e 35 apresentam a vista frontal e de

topo da estrutura B3 com NBI de 170 kV. A Figura 36 apresenta a estrutura B4 com NBI de 170 kV.

Tabela 14 – Características das estruturas tipo B.

Estrutura	Utilização	Isolador	Níveis de NBI
B1	Rede tangente	Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV
B2	Rede com ângulo ou fim de rede	Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV
B3	Derivação ou fim de rede	Disco	170 kV ou 300 kV
B4	Rede com ângulo	Disco e Pino	95 kV, 170 kV, 300 kV

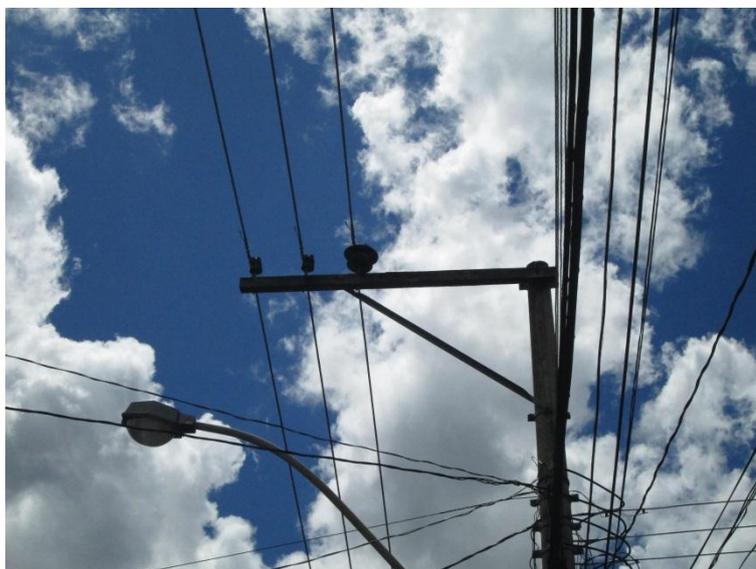


Figura 32 – Estrutura B1 de NBI 170 kV.



Figura 33 – Estrutura B2 para cabo protegido.

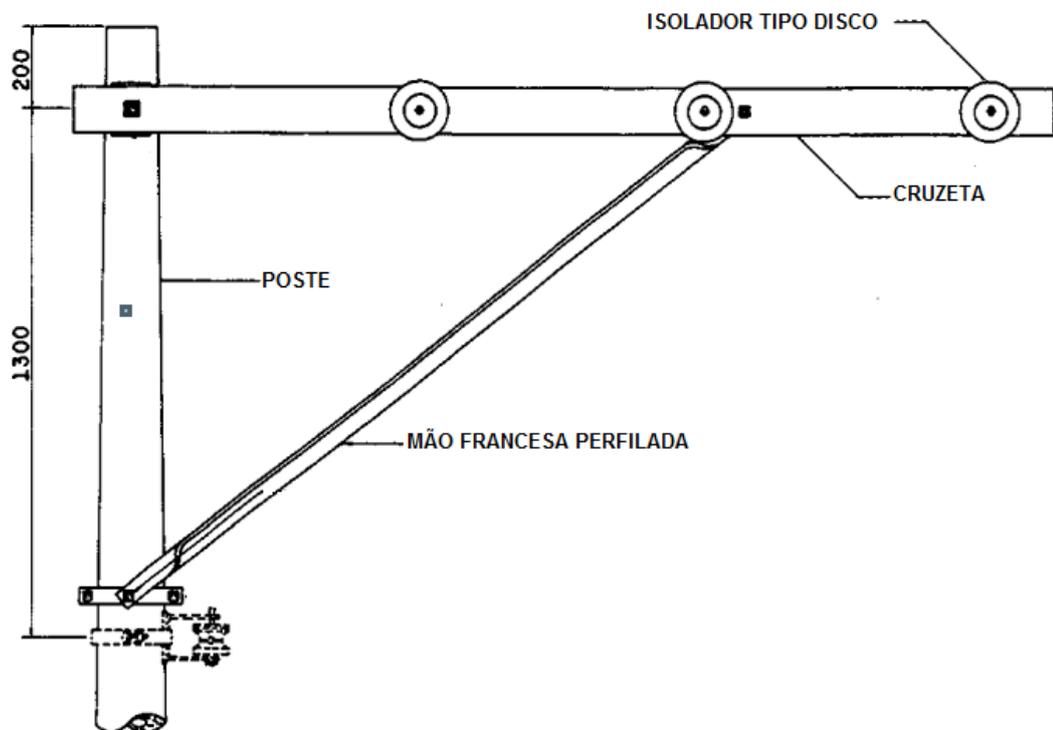


Figura 34 – Estrutura B3, vista frontal.

Fonte: Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas (2005, p. 5-12).

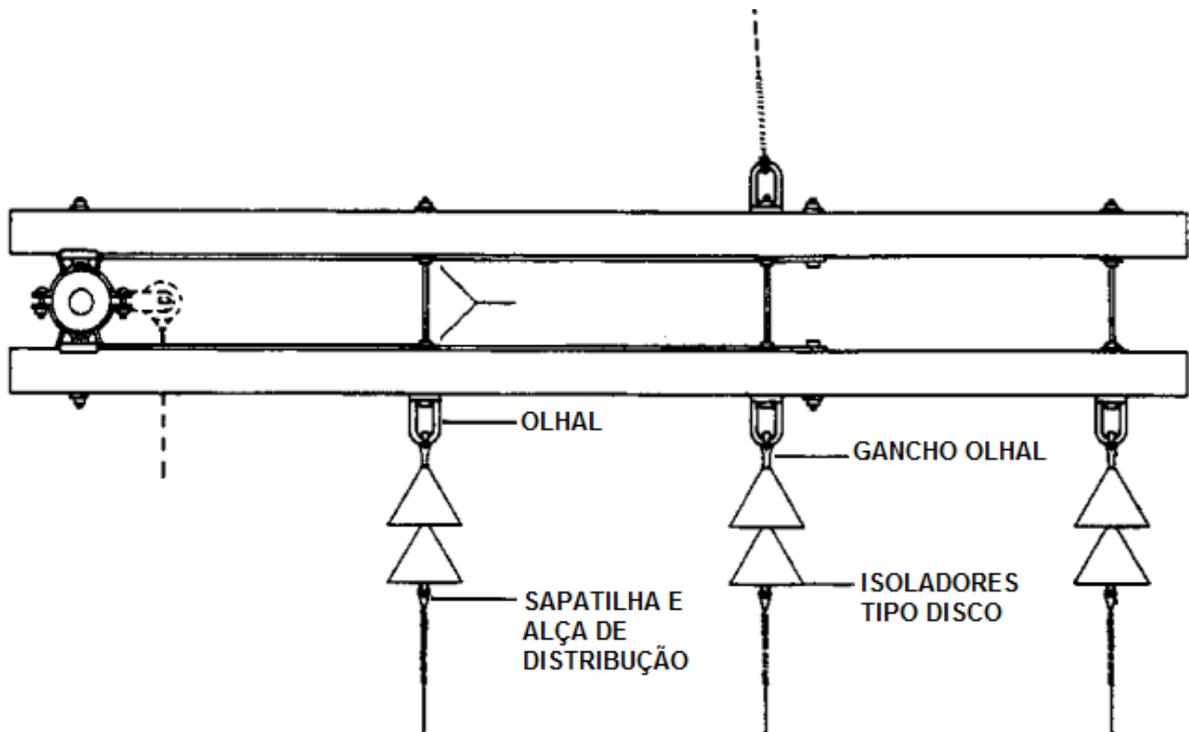


Figura 35 – Estrutura B3, vista do topo.

Fonte: Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas (2005, p. 5-12).



Figura 36 – Estrutura B4 de NBI 170 kV.

3.3.5. ESTRUTURA TIPO “CE”

Estruturas trifásicas de rede compacta utilizadas em rede tangente ou com ângulo. A nomenclatura das estruturas CE significa “compacta em espaçadores”. O NBI das redes compactas é padronizada em 220 kV. Nesta estrutura existem os condutores das fases, do neutro e o cabo mensageiro. Esta estrutura pode ser de cinco tipos: CE1, CE1S, CE2, CE3 e CE4. Os cinco tipos de estrutura podem ter cabo de aterramento, os aterramentos nos postes dependem da estrutura da rede.

A Tabela 15 apresenta as características principais dos tipos de estruturas CE. A Figura 37 apresenta a estrutura CE1. A Figura 38 apresenta a estrutura CE1S. A Figura 39 apresenta a estrutura CE2. A Figura 40 apresenta a estrutura CE3. A Figura 41 apresenta a estrutura CE4.

Tabela 15 – Características das estruturas tipo CE.

Estrutura	Utilização	Isolador	Níveis de NBI
CE1	Rede tangente	Losangular	220 kV
CE1S	Rede tangente	Losangular	220 kV
CE2	Rede com ângulo ou fim de rede	Pino	220 kV
CE3	Derivação ou fim de rede	Âncora	220 kV
CE4	Rede com ângulo	Âncora e Pino	220 kV

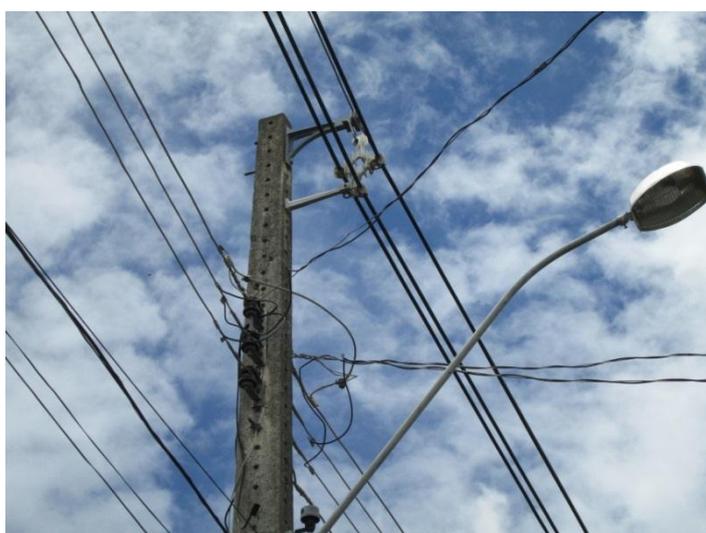


Figura 37 – Estrutura CE1.



Figura 38 – Estrutura CE1S.



Figura 39 – Estrutura CE2.



Figura 40 – Estrutura CE3.



Figura 41 – Estrutura CE4.

3.3.6. ESTRUTURA TIPO “CEJ”

Estruturas trifásicas de rede compacta utilizadas em rede tangente ou com angulação que possui afastamento. Esta estrutura denomina-se rede compacta em espaçadores com braço tipo J. O NBI das redes compactas é padronizada em 220 kV. Nesta estrutura existem os condutores fases, neutro e o cabo mensageiro. Esta estrutura pode ser de dois tipos: CEJ1 e CEJ2. Os dois tipos de estrutura podem ter cabo de aterramento, os aterramentos nos postes dependem da estrutura da rede.

A Tabela 16 apresenta as características principais dos tipos de estruturas CEJ. A Figura 42 apresenta a estrutura CEJ1. A Figura 43 apresenta a estrutura CEJ2.

Tabela 16 – Características das estruturas tipo CEJ.

Estrutura	Utilização	Isolador	Níveis de NBI
CEJ1	Rede tangente	Losangular	220 kV
CEJ2	Rede com ângulo	Pino	220 kV

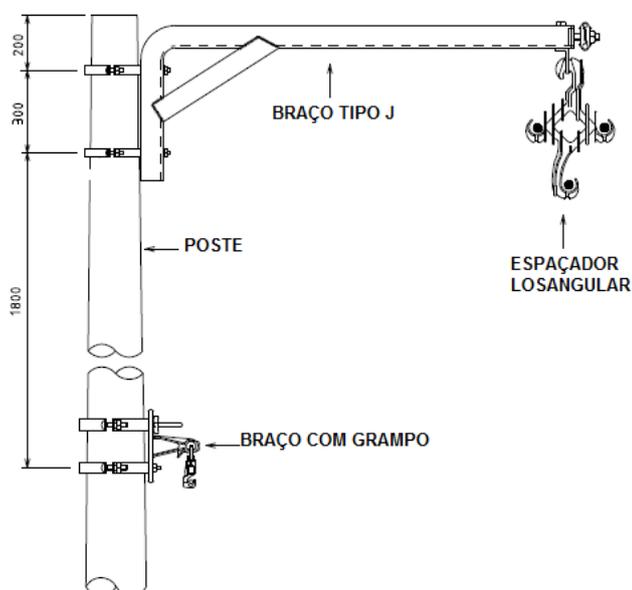


Figura 42 – Estrutura CEJ1.

Fonte: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Compactas (2012a, p. 3-12).

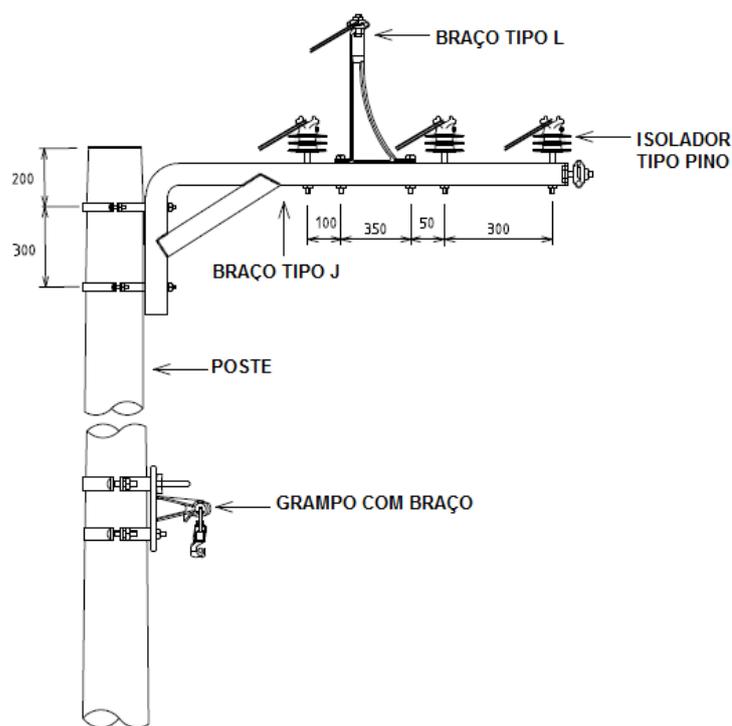


Figura 43 – Estrutura CEJ2.

Fonte: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Compactas (2012a, p. 3-13).

3.3.7. ESTRUTURA TIPO “CM”

Estruturas monofásicas de rede compacta utilizadas em rede tangente ou com angulação. O NBI das redes compactas é padronizada em 220 kV. Nesta estrutura existem os condutores da fase, do neutro e o cabo mensageiro. Está estrutura pode ser de cinco tipos: CM1, CM2, CM3, CM4 e CM1S. Os cinco tipos de estrutura podem ter cabo de aterramento, os aterramentos nos postes dependem da estrutura da rede.

A Tabela 17 apresenta as características principais dos tipos de estruturas CM. A Figura 44 apresenta a estrutura CM1. A Figura 45 apresenta a estrutura CM2. A Figura 46 apresenta a estrutura CM3. A Figura 47 apresenta a estrutura CM4.

Tabela 17 – Características das estruturas tipo CM.

Estrutura	Utilização	Isolador	Níveis de NBI
CM1	Rede tangente	Losangular	220 kV
CM1S	Rede tangente	Losangular	220 kV
CM2	Rede com ângulo ou fim de rede	Pino	220 kV
CM3	Derivação ou fim de rede	Âncora	220 kV
CM4	Rede com ângulo	Âncora e Pino	220 kV

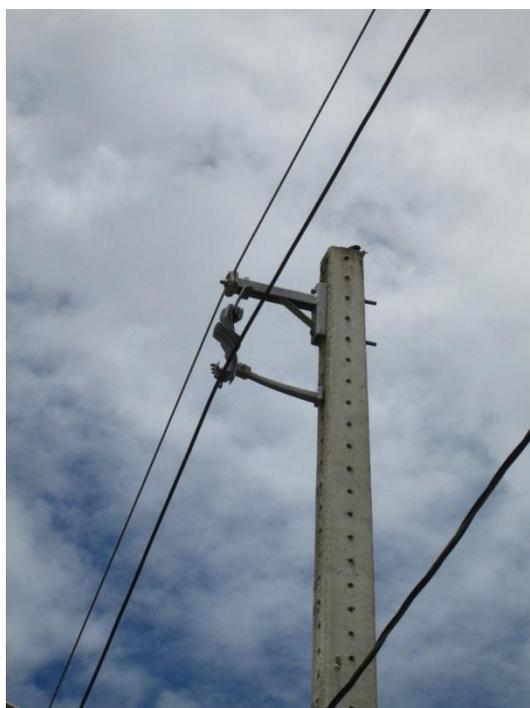


Figura 44 – Estrutura CM1.



Figura 47 – Estrutura CM4.

3.3.8. ESTRUTURA “HTE”

Estrutura trifásica convencional utilizada em zona rural. Esta estrutura é ancorada e é utilizada em redes com ângulo, pois suportam maiores forças exercidas pelas linhas de distribuição. Possuem NBI de 170 kV e 300 kV, sendo NBI 170 kV para a estrutura construída com poste duplo T e NBI 300 kV para estrutura construída com poste de madeira. Para áreas rurais sujeitas a fogo é preferível a utilização desta estrutura com NBI de 170 kV (CEMIG, 2012).

As três fases estão conectadas na estrutura primária e o neutro na estrutura secundária do poste central. Esta estrutura possui duas cruzetas de 5,0 m, dezoito isoladores de disco, sendo três isoladores para cada fase de vão anterior e posterior ao poste, três isoladores tipo pino, oito alças preformadas de distribuição, seis ganchos olhais, três laços preformados de topo, dez olhais e três postes.

As duas cruzetas de 5,0 m são instaladas paralelas por parafusos e arruelas e conectadas nos três postes. Cada fase é instalada na cruzeta na conexão com o poste e o afastamento entre as fases é de 2350 mm. As três fases são amarradas aos isoladores de disco por sapatilha e alça de distribuição e são amarradas também aos três isoladores de pino por laço preformado de topo. Três isoladores de disco são instalados no gancho olhal e assim conectam-se o gancho no olhal que está

instalado na cruzeta. O neutro é amarrado ao olhal por sapatilha e alça de distribuição. A Figura 48 apresenta a estrutura HTE com vista frontal e de topo.

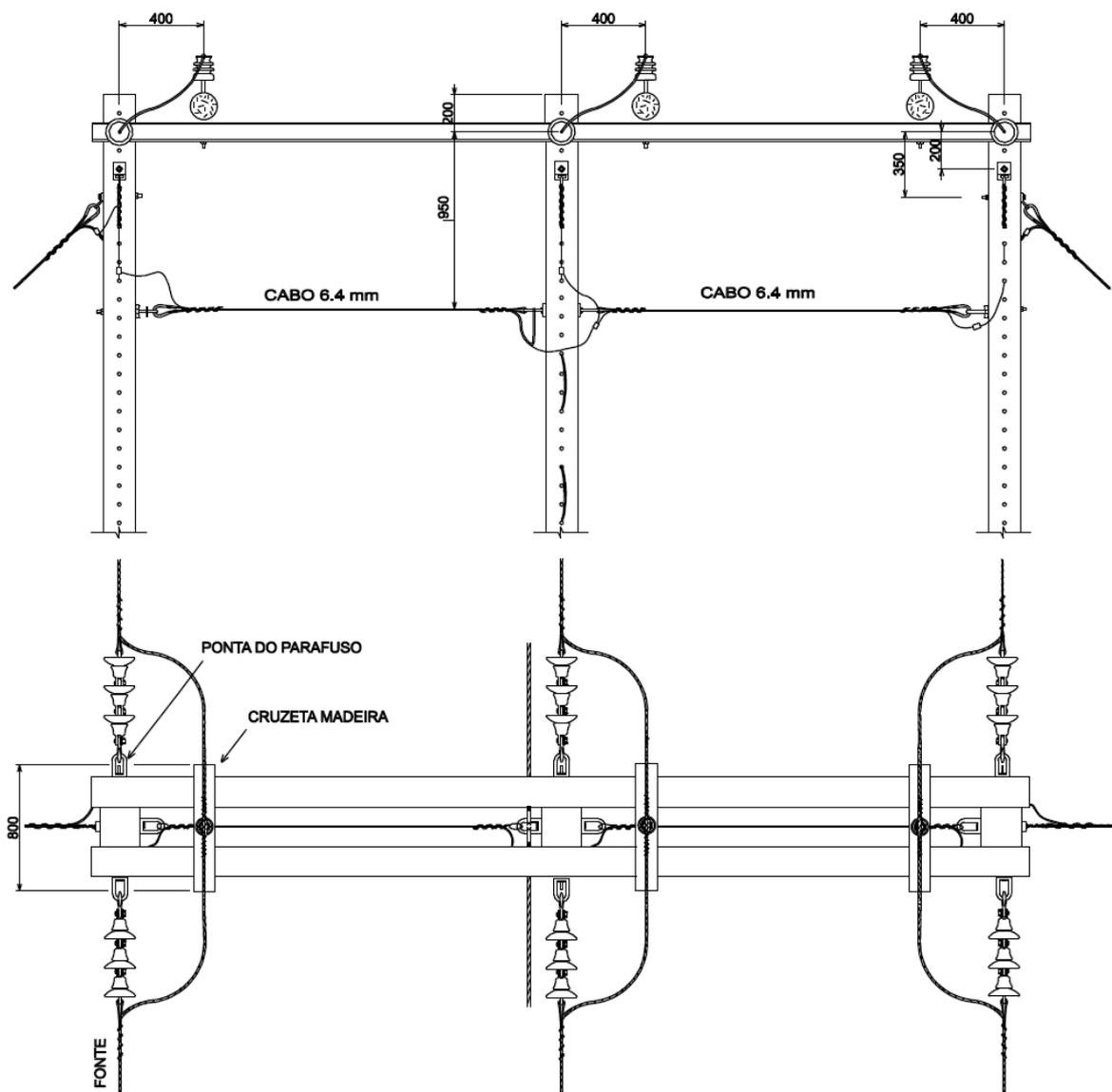


Figura 48 – Vista frontal e de topo da estrutura HTE.

Fonte: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais (2012, p. 5-16).

3.4. TRANSFORMADORES

Os transformadores são máquinas elétricas com princípio de funcionamento por indução eletromagnética. Sua função é transformar os valores de tensão e corrente de entrada por valores de tensão e corrente diferentes, dependendo do número de espiras do primário e do secundário.

Os transformadores encontrados no sistema de distribuição podem ser monofásicos ou trifásicos e desempenham a função de diminuir o valor da tensão da MT para valores de BT. Em Formiga os transformadores diminuem o nível de tensão de 13,8 kV para 380/220/127 V. Os valores nominais da potência dos transformadores encontrados no sistema de distribuição de Formiga são os indicados na Tabela 5.

Os transformadores da Cemig são identificados facilmente, pois cada transformador possui um número de identificação. Este número está pintado na carcaça do transformador, junto com este número vem pintado também a quantidade de fases e o valor da potência do transformador. A Figura 49 apresenta um transformador encontrado no levantamento de campo com número 282739 e indicando que é trifásico com potência de 112,5 kVA pintadas na carcaça do transformador.



Figura 49 – Transformador com dados pintados em sua carcaça.

Os transformadores encontrados na rede de distribuição podem ser considerados padronizados ou não padronizados. Os transformadores padronizados possuem para-raios de MT instalados na carcaça e para-raios secundários isolados para BT instalados no barramento de saída, além das coberturas para as buchas de MT e BT. Os transformadores padronizados são os que não possuem estes equipamentos. A Figura 50 apresenta um transformador padronizado no levantamento de campo.

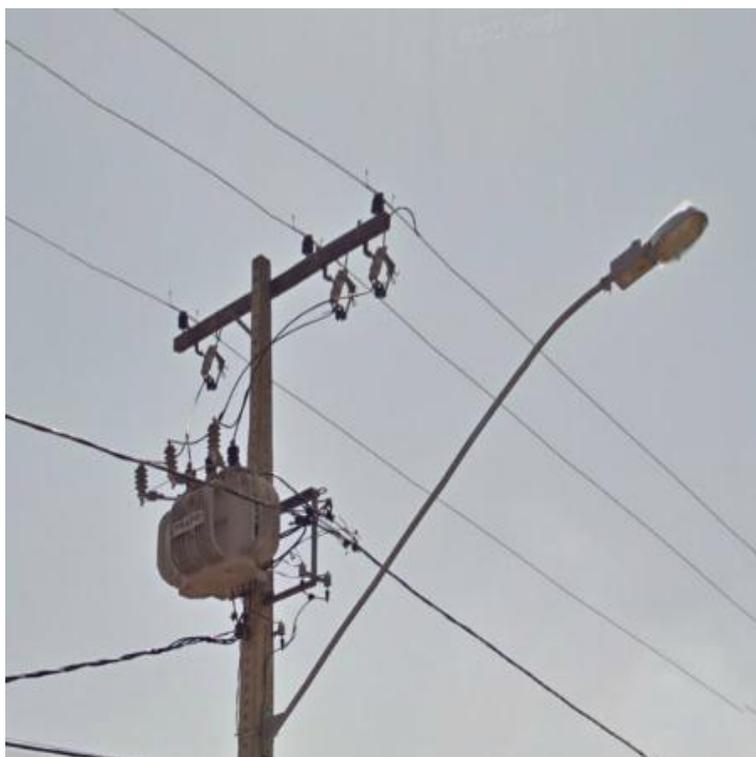


Figura 50 – Transformador padronizado.

3.5. ESTAI

Os estais podem ser encontrados tanto na zona urbana como na zona rural, possuem como função básica absorver os esforços de trações resultantes cujo a resistência interna do poste instalado não suporta.

Os estais podem ser dos tipos:

- Estai Âncora;
- Estai Poste a Poste;
- Contraposte;
- Estai Cruzeta poste.

Todos os tipos do estai são construídos com cabo de aço HS 9,5 mm ou 6,4 mm, e quando o cabo de aço for fixado no poste duplo T, este deve ser fixado por chapa para estai. Quando o poste for de madeira, o cabo de aço deve dar duas voltas em torno do poste (CEMIG, 2012).

O estai âncora pode ser de dois tipos:

- Estai Lateral – Conecta-se em 90° com o traçado da linha;
- Estai Longitudinal – conecta-se com o traçado da linha.

Os estais âncoras são utilizados somente em zona rural, este tipo de estai é utilizado em terrenos planos, aclives ou declives. São construídos amarrando o cabo de aço no poste e a partir de um ângulo entre o cabo de aço e o poste conecta-se a outra ponta do estai no chão do terreno. Se o terreno for plano o ângulo é de 45°, se o terreno for a aclive o ângulo pode ser entre 45° a 90° e se o terreno for a declive o ângulo mínimo é de 35°. O estai âncora absorve até 1200 daN.

Os estais âncora são utilizados em zona rural e urbana, com grande aplicabilidade em área urbana. São construídos conectando um poste ao outro com cabo de aço. O estai poste a poste absorve até 300 daN.

O contraposte é utilizado em zona rural e urbana. Amarra-se o cabo de aço no poste e no contraposte de madeira a 200 mm do topo, se o contraposte for de concreto duplo T a distância é de 150 mm do topo. Em qualquer tipo de contraposte o engastamento é de 1,6 m. O estai de contra-poste absorve no máximo 300 daN.

O estai cruzeta a poste possui grande aplicabilidade em zona urbana, este tipo de estai absorve praticamente todos os esforços do primário. O estaiamento do poste fica, portanto, na dependência dos esforços provenientes do secundário. O cabo de aço de 6,4 mm absorve esforços de até 700 daN e o cabo de 9,5 mm absorve esforços de até 1600 daN (CEMIG, 2002).

3.6. LEVANTAMENTO DE CAMPO

O sistema de distribuição é composto pelos alimentadores (rede tronco) e suas ramificações, possuindo extensões na área urbana e rural. Os alimentadores possuem longas distâncias e um levantamento de campo por todos os alimentadores requer muito tempo. Assim foi definido percorrer o alimentador FMA 03 para levantar a quantidade de transformadores, os vários tipos de estruturas existentes e os tipos de postes onde se encontram os transformadores. Percorrendo o alimentador, começando na SE.

Para percorrer o alimentador FMA 03 foram feitos dois *check-list*, um para analisar as condições dos transformadores e as estruturas encontradas em todo o sistema de distribuição de Formiga e o segundo para analisar as condições de recondutoramento da rede de distribuição de formiga em perímetro urbano. Os campos para preenchimento do primeiro *check-list* foram:

- Quantidade – Número de transformadores encontrados no alimentador;
- Fases – Qual a fase conectada no transformador monofásico, A, B, C ou as três fases para o transformador trifásico;
- Potência (kVA) – Potência do transformador em kVA;
- Número – O número do transformador conectado no alimentador;
- Padronizado – Se o transformador é padronizado ou não.
- Estrutura e Poste – Campo onde é inserido o tipo da estrutura MT, a altura e a resistência do poste, por exemplo, no primeiro transformador neste campo é anotado: M2-11-300;
- Estai – Se o poste onde se encontra o transformador possui ou não estai, se possui é anotado o tipo de estai existente;
- Afastador – Se o poste onde se encontra o transformador possui ou não afastador, se possui é anotado o tipo de afastador existente;
- Poste – É anotado o tipo de poste, concreto de seção circular (CC), madeira (MC) ou duplo T (DT).

Os campos para preenchimento do segundo *check-list* foram:

- Vão Anterior (VAN) – Medição do vão anterior ao poste de referência;
- Vão Posterior (VPO) – Medição do vão posterior ao poste de referência;
- Estrutura e Poste – Campo onde é inserido o tipo da estrutura MT, a altura e a resistência do poste, por exemplo, no primeiro transformador neste campo é anotado: M2-11-300;
- Poste – É anotado o tipo de poste, concreto de seção circular (CC), madeira (MC) ou duplo T (DT);
- Estai – Se o poste onde se encontra o transformador possui ou não estai, se possui é anotado o tipo de estai existente;
- Bitola do cabo – O valor da bitola do cabo.

Os dados obtidos no primeiro levantamento de campo estão inseridos no Anexo B e os dados obtidos no segundo levantamento de campo estão inseridos no Anexo C.

4. RESULTADOS

Inicialmente, os dados do primeiro levantamento de campo foram analisados para definir o valor da potência instalada no alimentador três e o balanço de carga entre as três fases, determinando se o mesmo está sobrecarregado.

Ressalta-se que o levantamento indica também onde se encontra a maior quantidade de carga, os consumidores que consomem maior potência, as chaves facas normalmente abertas que conectam o alimentador três com outros alimentadores e qual a predominância de tipo de poste encontrado no sistema de distribuição.

A partir da Figura 51 e a Tabela 18 percebeu-se que o alimentador está sobrecarregado e sendo assim seria necessário realizar o estudo de recondutoramento.

Para o recondutoramento utilizou-se os dados do segundo levantamento e através deste, foi possível reconduzir os trechos determinados pela análise, mostrados na Tabela 26.

Com esta metodologia, foram construídas as Tabelas 27 e 28. A Tabela 27 está relacionada aos orçamentos dos materiais, mão de obra de projeto e construção utilizados pelo recondutoramento e a Tabela 28 com o orçamento para uma linha de distribuição nova.

4.1. ANÁLISE DE POTÊNCIA

Os dados obtidos no primeiro levantamento de campo nos mostram que o valor de potência exigida pelo alimentador três da SE de Formiga é de 17,154 MVA. A SE de Formiga possui uma potência instalada de 25 MVA, sendo dois transformadores em paralelo com potência de 12,5 MVA, assim sendo, se o alimentador três demanda-se de toda a potência instalada em seu sistema, restaria apenas 7,846 MVA para os outros quatro alimentadores da SE. E se por acaso precisar desativar um dos transformadores da SE para manutenção preventiva ou

corretiva a SE não suportaria abastecer o alimentador três com energia se este estiver com demanda acima de 70%. Como forma de demonstrar a variação da demanda de energia elétrica e que em determinados períodos do dia a demanda estaria sobrecarregada, foi realizada a curva de demanda do alimentador três durante o dia segundo a porcentagem de demanda encontrada na curva de demanda em Kagan (2010), não foi possível realizar a curva a partir dos dados reais da demanda porque a Cemig não liberou os dados do sistema de medição.

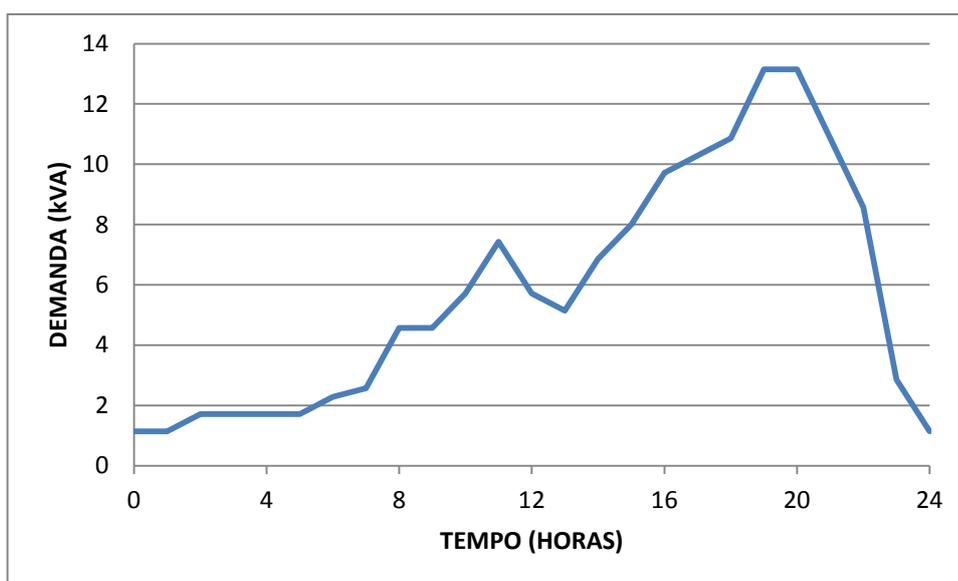


Figura 51 – Curva de demanda do alimentador três.

A Figura 51 mostra que a demanda de energia elétrica varia de acordo com a hora do dia, por exemplo, durante a madrugada, a demanda de energia é baixa e no início da noite a demanda de energia elétrica é alta, caracterizando sobrecarga.

A carga de 17,154 MVA foi balanceada entre as três fases e o resultado está apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Balanço entre as fases do alimentador três.

Balanço entre as fases do alimentador três	
Fases	Potência (kVA)
Fase A	5639,67
Fase B	5024,67
Fase C	6489,66

A partir da Tabela 18, observa-se que as três fases estão desbalanceadas, a fase C do alimentador três exige maior potência entre as fases e a fase B exige a menor. A diferença entre a fase C e B é de 1464,99 kVA e entre a fase C e A é 849,99 kVA. A diferença entre a fase A e B é de 615 kVA.

Esse enorme desbalanceamento de carga ocorre quando existe uma derivação monofásica de fase a, b ou c, os novos consumidores são conectados na rede que está próxima, ou seja, se houver clientes necessitando de ligamento perto de alguma derivação monofásica, serão conectados, acumulando carga na fase da derivação, ocasionando em alteração de balanceamento de carga. Isto pode ser observado nos dados do Anexo B, série de cargas ligadas em uma ramificação monofásica, como nos transformadores de 1306 a 1450, ocasionado uma carga de 1,256 kVA na ramificação monofásica de fase C.

Este desbalanceamento de cargas causa enorme perda de energia porque provocam o surgimento de tensões e correntes de sequências negativas, causando desequilíbrios de tensão para alguns consumidores. Quanto maior for a magnitude do desbalanceamento de tensão maior será a corrente que flui pelo neutro. E como a impedância do neutro não é zero no sistema real de distribuição, há uma diferença de tensão entre o neutro e a terra. E uma vez que as cargas no sistema de distribuição mudam a todo instante, a tensão no neutro irá variar bastante, podendo conter harmônicos e inclusive componente DC. Os harmônicos são correntes ou tensões senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência que o sistema de suprimento é projetado a operar, 60 Hz no caso do sistema de potência brasileiro, provocando instabilidade do sistema e perda de energia e a componente DC pode ter um efeito prejudicial nas estações transformadoras, polarizando os núcleos e saturando-os em operação normal, causando aumento da temperatura e diminuição da vida útil. O neutro não estando com nível de potencial diferente de zero, este está sujeito a interferências eletromagnéticas e radiofrequência, resultando em um ruído na rede que irá alimentar as cargas dos consumidores. Uma forma que a Cemig utiliza para diminuir este fenômeno é a utilização do sistema a 4 fios com neutro multi aterramento, aterrando o neutro nos postes que possuem aterramento, mesmo

assim dependendo da magnitude do desbalanceamento, ocorrerá os problemas citados acima.

O alimentador 3 possui alto índice de cargas conectadas, isto pode levar a ocorrência de sub-tensão no sistema de distribuição, causando aos consumidores serem alimentados com tensão cerca de 90% da tensão nominal, podendo ocasionar em funcionamento inadequado dos equipamentos dos clientes, causando prejuízos.

De acordo com o primeiro levantamento de campo, observa-se predominância de postes duplo T em zona urbana e rural. O poste de madeira é utilizado em zona rural somente em lugares onde o acesso é difícil e não tem como utilizar poste duplo T, pois como o poste duplo T é de concreto o transporte em área de acesso difícil poderia danificar o poste. Em zona urbana, não utiliza poste duplo T em lugares que exigem esforços em várias direções, preferindo a utilização assim de poste de concreto de seção circular. Um dos motivos da escolha do poste duplo T é a diferença de preços com os outros postes, como apresenta a Tabela 19.

A Tabela 19 apresenta os preços de postes de concreto de seção circular, duplo T e poste de madeira. Percebe-se que o preço dos postes varia de acordo com a altura e a resistência e em comparação entre os três tipos, o poste de concreto duplo T é o que possui menor preço e o poste de madeira de eucalipto tratada é o mais caro entre os três tipos.

Os transformadores do alimentador três encontrados na zona urbana são predominantemente trifásicos com potência superior a 30 kVA e os transformadores conectados na zona rural são predominantes monofásicos de potências de 5 kVA, 10 kVA, 15 kVA, 25 kVA e 37 kVA. A Tabela 20 apresenta a carga instalada na zona urbana e rural do alimentador três.

Tabela 19 – Preços de postes.

Poste	Altura (m)	Resistência (dAN)	Preço (R\$)
Concreto Seção Circular	10	300	623,43
Concreto Seção Circular	11	300	728,78
Concreto Seção Circular	11	600	1.202,13
Concreto Seção Circular	12	300	908,58
Concreto Seção Circular	12	600	1.327,93
Concreto Duplo T	10	300	559,13
Concreto Duplo T	11	300	677,94
Concreto Duplo T	11	600	875,04
Concreto Duplo T	12	300	793,96
Concreto Duplo T	12	600	978,47
Madeira	10	300	671,19
Madeira	11	300	789,78
Madeira	11	600	1.067,43
Madeira	12	300	943,49
Madeira	12	600	1.382,97

Fonte: Engelmig Elétrica LTDA (ENGELMIG, 2014).

Tabela 20 – Potência zona urbana e rural do alimentador três.

	Potência (MVA)
Zona Urbana	3,845
Zona Rural	13,309

Os dados da Tabela 20 nos mostram que as cargas no alimentador três encontra-se de forma predominante em zona rural ao longo das enormes ramificações do sistema de distribuição.

O alimentador possui tanto transformadores que atendem vários clientes como transformadores particulares determinados para somente um cliente, geralmente os transformadores com maior potência são os que atendem centros comerciais ou indústrias. A Tabela 21 apresenta os maiores consumidores conectados ao alimentador três de forma decrescente.

Tabela 21 – Transformador com maior potência no alimentador três.

Potência (kVA)	Fase	Número	Endereço
700	Trifásico	76196	Fazenda. Zona Rural.
250	Trifásico	161025	Penitenciária. Rua do Pequi, 300.
150	Trifásico	76166	Fazenda. Zona Rural.
112	Trifásico	282739	Rua Sete. Bairro Ouro Negro.
75	Trifásico	112033	DER-MG. Av. Brasil.

Os transformadores da Tabela 21 são tratados no seguinte modo, os três primeiros e o quinto transformadores são particulares, clientes especiais do alimentador três. O quarto transformador é utilizado em área urbana para atender vários clientes. Os clientes especiais são aqueles que consomem maior energia elétrica, necessitam de energia elétrica de forma integral e que se por alguma razão de contingência faltar energia elétrica durante um longo período de tempo, pode gerar multas para a concessionária de energia elétrica. Os clientes especiais conectados no alimentador três são duas fazendas, uma penitenciária e o DER-MG.

Os dados comprovam que somente o alimentador três possui uma carga instalada de 17,154 MVA, como não foi realizado o estudo de todos os alimentadores da SE de Formiga, não se pode concluir que os transformadores da SE estão trabalhando com sobrecarga, mas como o valor da carga instalada no alimentador três é alta, conclui-se que este alimentador está trabalhando com sobrecarga, desta forma um dos procedimentos a ser tomados será o do recondutoramento de alguns pontos necessários da linha do alimentador três, como o sistema do alimentador é extenso foi realizado o segundo levantamento.

O segundo levantamento de campo foi realizado em todo perímetro urbano e um trecho de 4 km de rede em zona rural para análise de recondutoramento. A partir do segundo levantamento, pode-se analisar que o recondutoramento não necessitava ser realizado em todo o trecho do circuito do perímetro urbano e sim em alguns pontos da rede tronco e em algumas derivações que conectam o alimentador três com outros alimentadores.

O alimentador três possui quatro chaves de manobra em perímetro urbano que interligam outros alimentadores em situações de contingências. A Tabela 22

apresenta o tipo da chave, a localização de cada chave, o alimentador de conexão, a corrente nominal, o número de identificação da chave, as chaves faca normalmente abertas que interligam o circuito de média tensão em situações de contingências dos alimentadores.

Tabela 22 – Chaves de manobra do alimentador três.

Tipo de Chave	Endereço	Alimentador	Corrente (A)	Número
Faca Adapt	R. Argentina	FMA 07	300	34575
Faca Unipolar	R. Abílio Machado, 362	FMA 04	400	34599
Faca Unipolar	Av. Brasil, 740	FMA 07	630	36839
Faca Unipolar	R. Nossa Senhora da Abadia, 912	FMA 07	400	37725

Observa-se que o circuito possui três chaves faca que interligam o alimentador três com o alimentador sete e uma chave faca que interliga o alimentador três com o alimentador quatro. Por exemplo, em situações de falta de energia no alimentador três, fecham-se essas chaves, fornecendo energia em grande área do circuito do alimentador três, reduzindo o número de clientes sem energia elétrica.

4.2. RECONDUTORAMENTO

O recondutoramento do alimentador três foi realizado de acordo com as normas e condições de recondutoramento segundo a Cemig. Ou seja, para um recondutoramento em área urbana as estruturas a serem utilizadas são todas protegidas e o cabo utilizado foi o de maior bitola protegido, 150 mm², pois assim transporta-se maior quantidade de energia. Para a zona rural pode ser utilizada estruturas convencionais e o cabo a ser utilizado é o de 336,4 MCM ou 170,46 mm². Observando para a zona rural que as únicas estruturas convencionais que suportam o cabo 336,4 MCM são as N1, N2, HTE e HTEE. Além disso, observar-se que a nova estrutura irá ou não possuir vão condenado, se ocorrer vão condenado a

estrutura terá que ser trocada por uma estrutura ancorada, neste caso, HTE ou HTEE. Vão condenado é quando o valor máximo do vão posterior terá que ser em relação ao valor do vão anterior considerando um fator de multiplicação que depende do tipo do cabo, Tabela 23. Divide-se o vão de maior tamanho pelo de menor e o cabo a ser utilizado, por exemplo, será o cabo 336,4 MCM, se o valor desta divisão for maior que 10 % o vão é condenado.

Tabela 23 – Relação entre vãos adjacentes.

Condutores	a2/a1
4 (AWG)	1,7
2 (AWG)	1,4
1/0 (AWG)	1,3
4/0 (AWG)	1,2
336,4 (MCM)	1,1

Fonte: Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Rurais (2005, p. 14-16).

Os dois tipos de cabos utilizados no recondutoramento deste trabalho foi o de 150 mm² para a área urbana e o de 336,4 MCM CAA para a zona rural. Estes cabos são os que transportam maior quantidade de corrente elétrica como apresenta a Tabela 24, valor da corrente transportada pelos cabos convencionais e a Tabela 25 mostra o valor da corrente nominal transportada pelos cabos protegidos. Deste modo, a repotenciação que utilizar cabo protegido poderá transportar uma potência de 6,2928 MVA e a repotenciação que utilizar cabo 336,4 MCM CAA poderá transportar uma potência de 9,0528 MVA.

Tabela 24 – Correntes em cabos convencionais.

Condutor	Cabo CA – 25°C	Cabo CAA – 25°C
	Corrente (A)	Corrente (A)
4 AWG	168	170
2 AWG	226	229
1/0 AWG	304	308
4/0 AWG	476	482
336,4 MCM	645	656

Fonte: Tabelas Práticas (1991, p. 2-2).

Tabela 25 – Correntes em cabos protegidos.

Seção (mm ²)	Corrente Nominal (A)
50	225
150	456

Fonte: Instalações Básicas de Redes de Distribuição Compactas (2012a, p. 12-2).

A análise definiu repotenciação em oito trechos do alimentador três para o segundo levantamento de campo, anexo C. Esses trechos de repotenciação foram escolhidos porque a repotenciação foi utilizada em alguns trechos que precisavam de repotenciação na linha tronco do alimentador, não foi necessário repotenciar a linha tronco inteira porque em alguns trechos o cabo existente já possui a maior bitola padronizada. A análise foi realizada desde a saída da SE até o ponto de saída dos enormes trechos monofásicos na área rural, onde se encontra a maioria das cargas do alimentador três, de acordo com a Tabela 20. E também em trechos que conectam o alimentador três com os alimentadores quatro e sete, Tabela 22, chaves faca normalmente aberta, que são trechos que requerem maiores quantidades de transporte de energia quando ocorrer alguma situação de contingência. Os sete trechos repotenciados ficaram divididos assim:

1. Poste 15 até o poste 17 – Conexão com alimentador sete;
2. Poste 29 até o poste 80 – Rede tronco no Urbano;
3. Poste 118 até o poste 121 – Conexão com alimentador sete;
4. Poste 136 até o poste 143 – Rede tronco no Urbano;

5. Poste 157 e 158 – Conexão com alimentador quatro;
6. Poste 208 até o poste 210 – Conexão com alimentador sete;
7. Poste 231 até o poste 271 – Rede tronco no Rural e Urbano.

Desta forma, estudou-se a repotenciação em cada poste, observando a estrutura existente, o poste com suas características, a distância do vão anterior e posterior, o tipo do cabo sem o recondutoramento e o cabo com recondutoramento, estais existentes nos postes, as forças existentes e as forças com recondutoramento em cada cabo. Determinando as alterações em cada poste. Abaixo está uma descrição detalhada das mudanças na rede em cada poste e no final de cada descrição dos oito trechos do processo de repotenciação está descrito o valor de projeto e mão de obra. Após a descrição dos oito projetos será apresentado uma lista com todos os materiais utilizados com o seu respectivo valor e o total do valor de todo o processo de repotenciação. Para determinar melhora no valor de potência transportada a Tabela 26 apresenta os valores existentes da potência transportada e os valores futuros dos trechos após a repotenciação.

Tabela 26 – Potências existentes e futuras com a repotenciação.

Trechos	Potência existente (MVA)	Potência futura (MVA)
Postes 15 a 17	4,1952	6,2928
Postes 29 a 35	4,1952	6,2928
Postes 36 a 47	3,105	6,2928
Postes 48 a 57	1,7927	6,2928
Postes 58 a 80	3,1188	6,2928
Postes 118 a 121	4,1952	6,2928
Postes 136 a 143	3,105	6,2928
Postes 157 e 158	4,1952	6,2928
Postes 208 a 210	1,7927	6,2928
Postes 231 a 260	4,2504	9,0528
Postes 261 a 271	4,1952	6,2928

O poste 14 teve a estrutura alterada por causa da transição de rede convencional para protegida dos postes 15 a 17. Assim a estrutura 14 que era B1

em primeiro nível e B3 em segundo nível mudou para B2 em primeiro nível e CEB3 no segundo nível. A estrutura CEB3 é uma estrutura que utiliza materiais de redes convencionais e protegidas, sendo a utilização dos isoladores de pino pilar da estrutura CE para conexão de cabo protegido em cruzeta de madeira da estrutura B3.

O poste 15 a estrutura mudou de M4 para CE4, o poste 16 a estrutura mudou de M1 para CE1 e o poste 18 a estrutura de primeiro nível mudou de BE1 para CEJ1, assim todas as estruturas foram padronizadas para estruturas protegidas. Alterou o cabo de 1/0 AWG CA convencional para o protegido de 150 mm², totalizando 156,7 metros de cabo de rede de distribuição urbana. Assim, a energia transportada deste ponto passou de 4,1952 MVA para 6,2929 MVA. Utilizaram-se também amarrações para conectar os cabos protegidos nos isoladores de pino e de ancoragem. Essa primeira parte do recondutoramento obteve um valor de R\$357,00 pelo projeto e R\$1.800,00 por mão de obra.

A segunda parte do projeto consiste em estudos dos postes 29 a 80 do segundo levantamento de campo, anexo C. A estrutura do poste 29 mudou de M2 para CE2, os postes 30, 33 e 34 mudaram de M1 para CE1, os postes 31 e 32 mudaram de BE1 para CEJ1 e o poste 35 a estrutura de primeiro nível M2 alterou para CE2, deste modo todas as estruturas dos postes de 29 a 35 foram alteradas de convencional para protegida. O cabo foi alterado de 1/0 AWG CA convencional para 150 mm² protegido, totalizando 255,9 metros de cabo de rede de distribuição urbana. Assim, a energia transportada deste ponto passou de 4,1952 MVA para 6,2929 MVA. Utilizou-se também amarrações para conectar os cabos aos isoladores tipo pino das estruturas CE2.

Não foi necessário alterar as estruturas dos postes de 36 a 47, pois os mesmos já eram estruturas protegidas trifásicas e todas suportam as forças exercidas pelo cabo de 150 mm². As estruturas dos postes 48 a 57 são estruturas protegidas monofásicas e assim foi necessária alterá-las para estruturas protegidas trifásicas, deste modo:

- Postes 48, 50 e 55 alteraram de CM1 para CE1;
- Poste 49 alterou de CM4 para CE4;
- Poste 51 alterou de CM2 para CE2;

- Poste 52 alterou de CM2-CM3 para CE2-CE3;
- Poste 53 alterou de CM1S para CE1S;
- Poste 54 e 57 alteraram de CM3 para CE3;
- Poste 56 alterou de CM3-CM3 para CE3-CE3.

Foi alterado também o cabo de 50 mm² para 150 mm² e foi utilizado amarrações para conectar o cabo 150 mm² nos isoladores tipo pino e ancoragem. Utilizou-se 788,6 metros de cabo trifásico protegido de 150 mm² em rede de distribuição urbana. E a potência transportada alterou de monofásica 1,7927 MVA para trifásica 6,2929 MVA.

As estruturas dos postes 58 a 79 alteraram de estruturas convencionas para estruturas protegidas. Alterando da seguinte forma:

- Postes 60, 61, 63, 65, 66, 67, 70, 72, 73, 74, 77, 78 e 79 a estrutura mudou de M1 para CE1;
- Postes 58, 62, 68, 69, 71 e 75 a estrutura mudou de B1 para CEJ1;
- Estrutura de secundo nível do poste 59 alterou de M2 para CE2;
- Poste 64 a estrutura mudou de M3 para CE3.

Por causa das forças exercidas no poste, foi preciso trocar dois postes, o primeiro foi o poste de concreto de seção circular número 58 e o outro foi o poste de concreto duplo T número 68, os dois postes eram de 10 metros de altura e resistência de 150 dAN e passaram para postes do mesmo tipo e com 11 metros de altura e resistência de 300 dAN. Alterou-se o cabo de 2 AWG CA convencional para 150 mm² protegido, totalizando 857,9 metros de cabo de rede de distribuição urbana. Assim, a potência instalada passou de 3,1188 MVA para 6,2929 MVA. Utilizou-se também de amarrações para conectar o cabo de 150 mm² nos isoladores tipo pino e ancoragem das estruturas. Esta segunda parte do projeto de repotenciação teve um custo de R\$6.188,00 de projeto e R\$31.920,00 de mão de obra.

A terceira parte do projeto consiste em substituição das estruturas convencionais para protegidas dos postes 118 a 121 e o recondutoramento de cabo 50 mm² para 150 mm². A estrutura dos postes 118 e 121 alterou de M4 para CE4, a estrutura do poste 119 e a estrutura de primeiro nível do poste 120 alterou de M1 para CE1 e a estrutura do nível secundário alterou de N2 para CE2. Foi necessária a

utilização de um estai cruzeta-poste no poste fim de rede 121 devido a força exercida pelo MT. Alterou-se o cabo de 1/0 AWG CA convencional para 150 mm² protegido, totalizando 72,5 metros de cabo de rede de distribuição rural urbana. Assim, a energia transportada deste ponto passou de 4,1952 MVA para 6,2929 MVA. Utilizou-se amarrações para conectar o cabo de 150 mm² nos isoladores tipo pino e ancoragem. O custo desta terceira parte foi R\$476,00 de projeto e R\$3.840,00 de mão de obra.

A quarta parte do projeto consiste em alteração da bitola do cabo protegido de 50 mm² para 150 mm² entre os postes 136 a 143. Totalizando em 270,9 metros de cabo trifásico protegido de rede de distribuição urbana. Desta forma, a potência transportada deste ponto passou de 3,105 MVA para 6,2929 MVA. Utilizou-se amarrações para conectar o cabo nos isoladores tipo pino e ancoragem. Foi necessário utilizar um estai cruzeta-poste no poste fim de rede 143 devido a força exercida pela MT. O custo da quarta parte foi de R\$952,00 com projeto e R\$3.360,00 com mão de obra.

A quinta parte do projeto consiste em alteração das estruturas dos postes 157 e 158 de rede convencional para protegida e substituição de cabo convencional 1/0 AWG CA para 150 mm² protegido, em um total de 72,2 m de rede de distribuição urbana. Assim a quantidade de potência transportada alterou de 4,1952 MVA para 6,2928 MVA. A estrutura do poste 157 passou de M1 para CE1 e do poste 158 mudou de M4 para CE4. Devido as forças exercidas sobre o poste 157 foi necessário mudar o poste de concreto de seção circular de 10 metros de altura e 150 dAN para 11 metros de altura e 300 dAN. Utilizaram-se amarrações para conectar o cabo nos isoladores de pino e ancoragem. O custo do quinto projeto foi de R\$238,00 para o projeto e R\$2.640,00 de mão de obra.

A sexta parte do projeto consiste em alterar a bitola do cabo de 50 mm² para 150 mm² de cabo protegido dos postes 208 a 210, totalizando em 98,9 metros de rede de distribuição urbana. Assim, a potência transportada passa de 1,7927 MVA para 6,2929 MVA. As estruturas alteraram de protegida monofásica para protegida trifásica, assim:

- Poste 208 alterou de CM1S para CE1S;
- Poste 209 alterou de CM1 para CE1;

- Poste 210 alterou de CM3 para CE3.

Utiliza-se também neste projeto substituição do cabo e amarrações para conexão entre os cabos e os isoladores de pino e ancoragem. O custo da sexta parte do projeto possui o valor de R\$357,00 com projeto e R\$1.800,00 com mão de obra.

A sétima parte do projeto consiste em alterar a bitola do cabo de 1/0 AWG CAA para 336,4 MCM CAA dos postes 231 a 260, totalizando 4,058 Km de rede de distribuição rural. Assim, a potência transportada muda de 4,2504 MVA para 9,0528 MVA. Ocorreram várias mudanças nas estruturas devido aos longos vãos encontrados, as mudanças devidas alguns vãos serem considerados vãos condenados e também pelo fato das forças atuantes nos postes excederem o valor que o poste existente suporta. Deste modo, segue abaixo o detalhamento da mudança nas estruturas de cada poste.

Os postes 231, 236 e 239 mudaram para estrutura de primeiro nível N2, sendo que o poste 231 era CEN4 e os postes 236 e 239 eram N4. Devido as forças necessárias foi preciso instalar 2 estais laterais de âncora em cada poste.

Os postes 232, 234, 235, 237, 250, 251, 255 e 257 mudaram para estrutura HTE devido condenação dos vãos existentes e estruturas que não suportam o cabo 336,4 MCM CAA, sendo que os postes 232, 234, 235, 237 e 255 eram estruturas N4 e ocorreu mudança para HTE devido condenação de vão existente, o poste 257 era N2 e passou para HTE devido condenação de vão existente e as estruturas dos postes 250 e 251 eram TE e mudaram por causa que estas estruturas não suportam o cabo 336,4 MCM CAA. Todos os postes que passaram para HTE mudaram para três postes de madeira de 11 metros de altura e 300 daN de resistência. Devido a estrutura HTE foi necessário instalar 8 estais, sendo 6 estais longitudinais e 2 estais laterais.

Os postes 233 e 241 não alteraram as estruturas, pois os mesmo possuíam estrutura N1 e este tipo de estrutura suporta cabo 336,4 MCM CAA. Devido à força exercida em cada poste, acrescentaram-se dois estais laterais em cada poste.

Os postes 238, 242, 243, 244, 245, 247, 248, 249, 252, 253 e 258 não alteraram as estruturas, pois os mesmo possuíam estrutura N1, mas devido ao poste existente de cada poste ser de 10 metros de altura e 150 daN foi preciso mudar para

postes de 11 metros de altura e 300 daN. Instalou-se também 2 estais laterais em cada poste.

Os postes 240, 246, 254, 256, 259 e 260 as estruturas alteraram para N1, sendo que os postes 240, 246, 254, 256 e 259 eram N4 e a estrutura do poste 260 era N3. Devido as forças existentes em cada poste foi necessário instalar 2 estais laterais nos postes 240, 246, 254 e 260 e um estai lateral nos postes 256 e 258.

Em todos os postes da sétima parte do projeto foi necessário a utilização de amarração para conectar o cabo 336,4 MCM CAA nos isoladores tipo pino e ancoragem. O custo de projeto é de R\$4.795,00 e a mão de obra é R\$97.152,00.

A oitava parte do projeto consiste em alteração das estruturas primárias de convencional para protegida e substituição de cabo convencional 1/0 AWG CA em cabo protegido de 150 mm², totalizando 364,4 metros de rede de distribuição urbana. Assim, a potência transportada aumenta de 4,1952 MVA para 6,2929 MVA. As estruturas dos postes 261 a 264 e 266 a 271 eram M1 e mudaram para CE1 e a estrutura do poste 265 mudou de M3 para CE3 no primeiro nível e de N3 para CE3 no segundo nível. Utilizaram-se amarrações para conectar o cabo nos isoladores de pino e ancoragem. O custo do da oitava parte do projeto foi de R\$1.309,00 para o projeto e R\$6.600,00 de mão de obra.

A lista de com todos os materiais, valor total de projeto e mão de obra utilizados neste projeto de repotenciação está apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Materiais utilizados na Repotenciação.

Descrição do Material:	UN	Qtde.	Vir. Unitário	Vir. Total
ALCA PREF DIST 170MM2	PC	84,00	5,57	467,88
ALCA PREF ESTAI CB 6,4MM	PC	36,00	3,53	127,08
ALCA PREF ESTAI CB 9,5MM	PC	182,00	7,99	1.454,18
ANEL ELAST AMAR ISOL PINO	PC	109,00	3,60	392,40
ARMAÇAO SECUND 1 ESTRIBO	PC	11,00	8,99	98,89
ARRUELA QUAD 38X18X3MM	PC	446,00	0,43	191,78
BRACO ANTI-BALANCO	PC	36,00	17,11	615,96
BRACO SUPORTE C	PE	21,00	95,13	1.997,73
BRACO SUPORTE L	PC	38,00	58,34	2.216,92
BRACO SUPORTE TIPO J - RDP	PE	9,00	430,40	3.873,60
CANTONEIRA PARA BRACO C	PC	10,00	63,43	634,30
CB ACO HS 3/8P (9,5MM) 7F	KG	1.909,62	4,60	8.784,26
CB ACO MR CL.A 6,4MM 7 F	KG	56,00	1,94	108,64
CB AL 1X 50MM2 15KV PROT	M	142,50	6,04	860,70
CB AL 1X150MM2 15KV PROT	M	9.105,00	13,31	121.187,55
CB CAA 170MM2 (336,4MCM)	KG	2.871,66	23,41	67.225,56
CHAPA P/ANCORA 320X320MM	PC	106,00	30,73	3.257,38
CHAPA PARA ESTAI	PC	42,00	5,87	246,54
CINTA ACO D 170MM	PC	14,00	14,45	202,30
CINTA ACO D 180MM	PC	9,00	16,30	146,70
CINTA ACO D 190MM	PC	5,00	16,08	80,40
CINTA ACO D 200MM	PC	11,00	16,71	183,81
CINTA ACO D 210MM	PC	3,00	17,34	52,02
CINTA ACO D 220MM	PC	2,00	17,47	34,94
CINTA ACO D 230MM	PC	2,00	18,01	36,02
CONETOR ATER FERRAGEM IP	PC	20,00	0,84	16,80
CONETOR H ITEM 1	PC	16,00	1,33	21,28
CONETOR H ITEM 2	PC	42,00	1,47	61,74
CONETOR H ITEM 3	PC	32,00	3,23	103,36
CONETOR TERM ACO 6,4/21	PC	21,00	1,10	23,10
CONETOR TERM COMP 50MM2	PC	21,00	1,17	24,57
CRUZ/CONTRAP EUC 5M MEDIO	PC	16,00	214,74	3.435,84
CRUZETA ROLIÇA DE EUCALIPTO 2,40M	PÇ	7,00	65,93	461,51
ESPAÇADOR LOSANG P/50-150	CJ	314,00	25,67	8.060,38
ESTRIBO P/ BRACO TIPO L	PC	46,00	9,79	450,34
FIXADOR PREF ESTAI 9,5MM	PC	64,00	5,42	346,88
GANCHO OLHAL 50KN	PC	50,00	6,89	344,50
GRAMPO ANCORAGEM 150MM2	PC	114,00	24,46	2.788,44
HASTE ANCORA-OLHAL 1600 MM	PC	106,00	28,97	3.070,82

ISOL ANCORAGEM POLIM 15KV	PC	110,00	39,43	4.337,30
ISOL PINO POLIM 15KV	PC	36,00	20,12	724,32
ISOL ROLDANA	PC	11,00	2,84	31,24
ISOLADOR PILAR 15KV	PC	43,00	95,68	4.114,24
ISOLADOR PILAR 25/35KV	PC	1,00	112,01	112,01
LACO PREF TOPO 34MM2	PC	3,00	2,82	8,46
LACO PREF TOPO 170MM2	PC	81,00	4,52	366,12
LUVA EMENDA CA 150MM2 RDP	PC	5,00	13,93	69,65
MANILHA SAPATILHA 50KN	PC	126,00	8,86	1.116,36
MANTA AUTO-ADESIVA 15KV RDP	PC	5,00	56,43	282,15
MAO FRANCESA PERF BECO	PC	2,00	51,59	103,18
MAO FRANCESA PERFILADA	PC	5,00	22,94	114,70
OLHAL P/PARAFUSO 70KN	PC	148,00	12,74	1.885,52
PARA-RAIOS 12KV 10KA ZNO	PC	21,00	116,81	2.453,01
PARAF.CAB.ABAUL.M12X 40MM	PC	22,00	2,17	47,74
PARAF.CAB.ABAUL.M16X 45MM	PC	24,00	2,42	58,08
PARAF.CAB.ABAUL.M16X 70MM	PC	182,00	2,59	471,38
PARAF.CAB.ABAUL.M16X150MM	PC	2,00	3,45	6,90
PARAF.CAB.QUAD.M16X150MM	PC	22,00	3,97	87,34
PARAF.CAB.QUAD.M16X200MM	PC	144,00	4,77	686,88
PARAF.CAB.QUAD.M16X250MM	PC	185,00	5,69	1.052,65
PARAF.CAB.QUAD.M16X300MM	PC	20,00	6,26	125,20
PARAF.CAB.QUAD.M16X450MM	PC	3,00	8,69	26,07
PARAF.CAB.QUAD.M16X600MM	PC	24,00	11,22	269,28
PINO CRUZ PARA BRACO C	PC	36,00	3,52	126,72
PINO CURTO PARA ISOLADOR PILAR	PC	24,00	32,11	770,64
PINO PARA ISOLADOR PILAR (CRUZ)	PC	20,00	52,57	1.051,40
PORCA QUADRADA M16 X 24MM	PC	6,00	0,73	4,38
POSTE CONC CC 11M 300DAN	PC	3,00	782,78	2.348,34
POSTE CONC DT 11M 300DAN	PC	12,00	677,94	8.135,28
POSTE EUC.PRES.11M 300DAN	PC	24,00	789,78	18.954,72
SAPATILHA	PC	186,00	1,30	241,80
SELA P/CRUZETA	PC	2,00	6,06	12,12
SUPORTE PARA ISOLADOR PILAR	PC	24,00	116,28	2.790,72
SUPORTE Z P/CHAVE FUSIVEL	PC	7,00	14,60	102,20
UNID. SERV. CONST. RDA	US	124,26	1.200,00	149.112,00
UNID. SERV. DE PROJETO	US	209,60	70,00	14.672,00
TOTAL				450.559,20

Fonte: Engelmig Elétrica LTDA (ENGELMIG, 2014).

Como forma de comparar a repotenciação com a construção de um novo alimentador, foi orçado o projeto de expansão dos trechos que foram repotenciados como se fossem novos. A Tabela 28 apresenta os materiais com os valores de mão de obra de projeto e construção.

Tabela 28 – Materiais utilizados na extensão de novo alimentador.

Descrição do Material :	UN	Qtde.	Vir. Unitário	Vir. Total
ALCA PARA ESTRIBO ABERTA	PC	68,00	6,68	454,24
ALCA PREF DIST 170MM2	PC	84,00	5,57	467,88
ALCA PREF ESTAI CB 6,4MM	PC	32,00	3,53	112,96
ALCA PREF ESTAI CB 9,5MM	PC	151,00	7,99	1.206,49
ANEL ELAST AMAR ISOL PINO	PC	117,00	3,60	421,20
ARMAÇAO SECUND 1 ESTRIBO	PC	16,00	8,99	143,84
ARRUELA QUAD 38X18X3MM	PC	765,00	0,43	328,95
BRACADEIRA PLAST CB MULT	PC	275,00	0,14	38,50
BRACO ANTI-BALANCO	PC	43,00	17,11	735,73
BRACO P/IP TIPO MEDIO	PC	84,00	159,31	13.382,04
BRACO SUPORTE C	PE	20,00	95,13	1.902,60
BRACO SUPORTE L	PC	54,00	58,34	3.150,36
BRACO SUPORTE TIPO J - RDP	PE	10,00	430,40	4.304,00
CANTONEIRA PARA BRACO C	PC	7,00	63,43	444,01
CARTUCHO APLICACAO AZUL	PC	48,00	5,62	269,76
CB ACO HS 3/8P (9,5MM) 7F	KG	1.882,37	4,60	8.658,90
CB ACO MR CL.A 6,4MM 7 F	KG	117,40	1,94	227,76
CB AL 1X 50MM2 15KV PROT	M	372,50	6,04	2.249,90
CB AL 1X150MM2 15KV PROT	M	9.180,00	13,31	122.185,80
CB CAA 170MM2 (336,4MCM)	KG	2.787,85	23,41	65.263,47
CB CU 1X 1,5MM2 1KV XLPE	M	798,00	1,03	821,94
CB QUAD CA 3X1X120+70 1KV	M	2,95	27,95	82,56
CB TRIP CA 2X1X70+70 1KV	M	4,00	12,48	49,92
CHAPA P/ANCORA 320X320MM	PC	84,00	30,73	2.581,32
CHAPA PARA ESTAI	PC	20,00	5,87	117,40
CINTA ACO D 170MM	PC	20,00	14,45	289,00
CINTA ACO D 180MM	PC	12,00	16,30	195,60
CINTA ACO D 190MM	PC	8,00	16,08	128,64
CINTA ACO D 200MM	PC	11,00	16,71	183,81
CINTA ACO D 210MM	PC	28,00	17,34	485,52
CINTA ACO D 220MM	PC	14,00	17,47	244,58
CINTA ACO D 230MM	PC	32,00	18,01	576,32
CINTA ACO D 240MM	PC	4,00	19,15	76,60

CINTA ACO D 250MM	PC	6,00	20,79	124,74
CINTA ACO D 270MM	PC	2,00	22,52	45,04
CONETOR ATER FERRAGEM IP	PC	14,00	0,84	11,76
CONETOR CUNHA AL 50 C/EB	PC	6,00	13,11	78,66
CONETOR CUNHA AL 150 C/EB	PC	48,00	16,22	778,56
CONETOR CUNHA CU ITEM 6	PC	9,00	4,48	40,32
CONETOR DE Perf. 35-120MM ² / 1,5MM ²	PC	156,00	0,00	0,00
CONETOR H ITEM 1	PC	28,00	1,33	37,24
CONETOR H ITEM 2	PC	100,00	1,47	147,00
CONETOR H ITEM 3	PC	148,00	3,23	478,04
CONETOR H ITEM 7	PC	19,00	6,51	123,69
CONETOR TERM ACO 6,4/21	PC	69,00	1,10	75,90
CONETOR TERM COMP 50MM ²	PC	21,00	1,17	24,57
CRUZ/CONTRAP EUC 5M MEDIO	PC	16,00	214,74	3.435,84
CRUZETA ROLIÇA DE EUCALIPTO 2,40M	PÇ	26,00	65,93	1.714,18
ESPACADOR LOSANG P/50-150	CJ	314,00	25,67	8.060,38
ESTRIBO P/ BRACO TIPO L	PC	60,00	9,79	587,40
FIXADOR PREF ESTAI 9,5MM	PC	64,00	5,42	346,88
GANCHO OLHAL 50KN	PC	68,00	6,89	468,52
GRAMPO ANCORAGEM 50MM ²	PC	8,00	24,26	194,08
GRAMPO ANCORAGEM 150MM ²	PC	87,00	24,46	2.128,02
GRAMPO LINHA VIVA	PC	6,00	32,44	194,64
HASTE ANCORA-OLHAL 1600MM	PC	84,00	28,97	2.433,48
HASTE ATERRAMENTO 2,40M	PC	48,00	35,98	1.727,04
IDENTIFICADOR DE FASE A	PC	55,00	0,92	50,60
IDENTIFICADOR DE FASE B	PC	59,00	0,92	54,28
IDENTIFICADOR DE FASE C	PC	52,00	0,92	47,84
ISOL ANCORAGEM POLIM 15KV	PC	133,00	39,43	5.244,19
ISOL PINO POLIM 15KV	PC	45,00	20,12	905,40
ISOL ROLDANA	PC	16,00	2,84	45,44
ISOLADOR PILAR 15KV	PC	91,00	95,68	8.706,88
ISOLADOR PILAR 25/35KV	PC	1,00	112,01	112,01
LACO PREF TOPO 34MM ²	PC	3,00	2,82	8,46
LACO PREF TOPO 170MM ²	PC	87,00	4,52	393,24
LAMP VS 100W AP E-40 TUBULAR	PC	84,00	20,78	1.745,52
LUM C/EQUIP VS 100W VIDRO PLANO	PC	84,00	210,00	17.640,00
LUVA EMENDA CA 150MM ² RDP	PC	5,00	13,93	69,65
MANILHA SAPATILHA 50KN	PC	83,00	8,86	735,38
MANTA AUTO-ADESIVA 15KV RDP	PC	27,00	56,43	1.523,61
MAO FRANCESA PERF BECO	PC	2,00	51,59	103,18
MAO FRANCESA PERFILADA	PC	24,00	22,94	550,56
OLHAL P/PARAFUSO 70KN	PC	216,00	12,74	2.751,84
PARA-RAIOS 12KV 10KA ZNO	PC	21,00	116,81	2.453,01

PARAF.CAB.ABAUL.M12X 40MM	PC	24,00	2,17	52,08
PARAF.CAB.ABAUL.M16X 45MM	PC	113,00	2,42	273,46
PARAF.CAB.ABAUL.M16X 70MM	PC	372,00	2,59	963,48
PARAF.CAB.ABAUL.M16X150MM	PC	2,00	3,45	6,90
PARAF.CAB.QUAD.M16X150MM	PC	44,00	3,97	174,68
PARAF.CAB.QUAD.M16X200MM	PC	136,00	4,77	648,72
PARAF.CAB.QUAD.M16X250MM	PC	360,00	5,69	2.048,40
PARAF.CAB.QUAD.M16X300MM	PC	139,00	6,26	870,14
PARAF.CAB.QUAD.M16X350MM	PC	16,00	7,16	114,56
PARAF.CAB.QUAD.M16X400MM	PC	13,00	7,81	101,53
PARAF.CAB.QUAD.M16X450MM	PC	3,00	8,69	26,07
PARAF.CAB.QUAD.M16X600MM	PC	24,00	11,22	269,28
PINO CRUZ PARA BRACO C	PC	45,00	3,52	158,40
PINO CURTO PARA ISOLADOR PILAR	PC	24,00	32,11	770,64
PINO PARA ISOLADOR PILAR (CRUZ)	PC	68,00	52,57	3.574,76
PORCA QUADRADA M16 X 24MM	PC	27,00	0,73	19,71
POSTE CONC CC 11M 300DAN	PC	20,00	782,78	15.655,60
POSTE CONC CC 11M 600DAN	PC	5,00	1.202,13	6.010,65
POSTE CONC CC 12M 300DAN	PC	1,00	908,58	908,58
POSTE CONC CC 12M 600DAN	PC	1,00	1.327,93	1.327,93
POSTE CONC DT 11M 300DAN	PC	64,00	677,94	43.388,16
POSTE CONC DT 11M 600DAN	PC	8,00	875,04	7.000,32
POSTE CONC DT 12M 300DAN	PC	3,00	793,96	2.381,88
POSTE CONC DT 12M 600DAN	PC	2,00	978,47	1.956,94
POSTE EUC.PRES.11M 300DAN	PC	24,00	789,78	18.954,72
RELE FOTOEL ELETRON 105-305V	PC	84,00	20,51	1.722,84
SAPATILHA	PC	200,00	1,30	260,00
SELA P/CRUZETA	PC	2,00	6,06	12,12
SUORTE L P/ TOPO POSTE	PC	6,00	32,33	193,98
SUORTE PARA ISOLADOR PILAR	PC	24,00	116,28	2.790,72
SUORTE Z P/CHAVE FUSIVEL	PC	5,00	14,60	73,00
UNID. SERV. CONST. RDR	US	141,59	1.200,00	169.908,00
UNID. SERV. DE PROJETO	US	144,17	70,00	10.091,90
TOTAL				590.888,83

Fonte: Engelmig Elétrica LTDA (ENGELMIG, 2014).

As Tabela 27 e a Tabela 28 apresentam todos os materiais utilizados e o valor de mão de obra de projeto e construção. Observa-se que o valor total da repotenciação é de R\$450.559,20 e o valor total da extensão é de R\$590.888,83, ou

seja, utilizando o método de recondução na repotenciação o valor do investimento é 23,75% mais barato do que construir uma nova linha.

A diferença entre os dois valores é de R\$140.329,63, essa diferença ocorreu porque no recondução alguns materiais são aproveitados e os materiais que precisam ser substituídos são os cabos, amarrações dos cabos, algumas estruturas, alguns postes que não suportam a força do novo condutor e conexões. E para uma linha nova todos os materiais são novos.

O valor da mão de obra de projeto para recondução é mais cara em relação a uma nova linha porque para alteração em postes o valor cobrado é cerca de R\$119,00 por poste e para construir um novo poste o valor cobrado é cerca de R\$70,00. Por isso o valor da mão de obra de projeto do recondução é R\$14.672,00 e o valor do projeto da nova linha é R\$10.091,90.

O valor da mão de obra de construção para recondução é mais barata em relação a uma nova linha porque a alteração em postes varia com o serviço que será executado, em média o valor é cerca de R\$600,00, enquanto que para instalar um novo poste o valor de mão de obra é de R\$1.200,00. Por isso o valor da mão de obra do recondução é R\$149.112,00 e o valor da mão de obra da nova linha é R\$169.908,00.

5. CONCLUSÃO

A repotenciação é uma forma rápida e econômica de ampliar a capacidade do sistema de distribuição, como abordado no Capítulo 1. Dentre as alternativas para a repotenciação, existe a elevação da classe de tensão da rede de distribuição e alteração do limite térmico, técnicas desconsideradas neste trabalho e o recondutoramento, técnica utilizada neste trabalho.

A técnica de elevação da classe de tensão desconsidera-se porque causaria várias mudanças no sistema de distribuição, como a substituição de todas as estações transformadoras (transformadores), todos os isoladores tipo pino e disco, todas as estruturas, porque o espaçamento entre as estruturas existentes para nível de tensão de 15 kV não suportaria classe de tensão de 34,5 kV, substituição do aterramento e de todos os equipamentos de proteção encontrados no sistema e também substituição de todos os componentes e equipamentos da SE.

A técnica de alteração do limite térmico desconsidera-se porque o sistema de distribuição é extenso e seria inviável ter um estudo detalhado de vento e temperatura de todo o sistema, além disso, a demanda de energia do sistema de distribuição varia ao longo do dia.

Este trabalho propôs uma análise técnica-econômica dos alimentadores e transformadores da SE de Formiga. Como o sistema de distribuição é extenso, percorreu-se o alimentador três da SE, destaca-se como importante contribuição deste trabalho, os dois levantamentos de campo, o primeiro foi para identificar a quantidade, as condições dos postes e estruturas e quais as fases ligadas nas estações transformadoras, dados encontrados no anexo B. A partir destes dados foi possível analisar e concluir que o alimentador três da SE de Formiga precisa ser repotenciado, pois este alimentador está trabalhando por alguns períodos do dia com sobrecarga, de acordo com Tabela 18, Tabela 20 e Figura 51. Para realizar a repotenciação foi realizado o segundo levantamento de campo, como forma de levantar os dados de todos os postes, estruturas e condições encontradas na área urbana e em 4 km de área rural do alimentador três, dados encontrados no anexo C.

A análise técnica definiu a utilização de repotenciação por recondutoramento, resume-se em verificar quais as alterações necessárias em cada poste que se necessita de recondutoramento e qual a corrente e potência existente atualmente e após o recondutoramento e a análise econômica resume-se em verificar qual a vantagem em utilizar a repotenciação de linha de distribuição em comparação com a construção de uma linha de distribuição nova. A partir dos resultados obtidos, de acordo com Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28, verificou-se que a quantidade de potência nas linhas praticamente dobram e o valor do investimento é 23,75 % mais barato do que a construção de uma nova linha de distribuição.

Assim, pelos estudos realizados, fica claro que a técnica de recondutoramento para sistemas de distribuição acarreta em diminuição de investimento e melhora nas condições de transporte de energia elétrica para as concessionárias de energia que adotam sua utilização.

Cabe comentar que a diferença entre o valor do investimento em recondutoramento e o valor do investimento de uma linha nova só não foi maior porque na área rural foi necessário substituir alguns postes existentes por postes com maior resistência mecânica e também ocorreu substituição das estruturas existentes por estruturas HTE que possuem três postes e são mais caras.

Ressalta-se também que para a real repotenciação da linha de distribuição, deve ser considerado um estudo sobre a troca de equipamentos de proteção e coordenação, como por exemplo, as chaves faca que conectam o alimentador três com os alimentadores quatro e sete, Tabela 22, possuem correntes nominais inferiores a corrente nominal da linha com repotenciação, que é 656 A para o cabo CAA 336,4 MCM e 456 A para o cabo protegido de 150 mm². Também é necessário comentar que para projetos de recondutoramento é necessário a aprovação e estudo da concessionária de energia responsável pela linha de distribuição, em nosso caso, seria a Cemig.

5.1. CONTINUIDADE DO TRABALHO

O grande diferencial deste trabalho foi o levantamento de campo de todo o alimentador três para saber a real situação em que este se encontrava.

Este tipo de dado possibilita determinar todas as reais condições do alimentador, desbalanceamento de carga, sobrecarga do alimentador, principais consumidores, condições de todas as estruturas do alimentador. Este mesmo estudo pode ser realizado para todos os outros quatro alimentadores, assim teria todas as informações do sistema de distribuição de Formiga, podendo:

- Determinar qual alimentador está trabalhando com sobrecarga ou se todos os alimentadores estão trabalhando com sobrecarga;
- Determinar qual a situação de uso dos dois transformadores da SE de Formiga, se estão trabalhando com sobrecarga ou se suportam acréscimo de mais um alimentador.

Se for determinado após o estudo de todo sistema de distribuição de Formiga que os transformadores da SE estão trabalhando com sobrecarga, se é possível a substituição desses transformadores para transformadores que suportem maior quantidade de carga ou se é necessário a construção de uma nova SE, como abordado na Seção 2.3.

O sistema de distribuição cresce rapidamente e este tipo de trabalho pode ser realizado não só na SE de Formiga, mas em todas as SE de outras cidades e de todas as concessionárias, determinando a situação em que se encontram. Como por exemplo, utilizar este tipo de trabalho no alimentador que abastece a cidade de Nova Serrana em Minas Gerais, cidade que abrange enormes quantidades de fábricas, repletas de consumidores particulares.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica: **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 11 dez. 2013.

ANEEL. Proposta de abertura de Consulta Pública para o recebimento de dados e contribuições para análise dos impactos da aplicação do Decreto nº 97.180, de 16 dezembro de 1988 (Padronização das tensões): **Nota Técnica nº 0075/2011**. Brasília, 2011.

BIASOTTO, Etienne. **Um procedimento de análise para a repotênciação de linhas de subtransmissão de 34,5 kV para 69 kV**, São Carlos, 2009, p. 134. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BOZZI, F, A., SILVA, R, F., **Trabalho de Subestação**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

CELG, Companhia Energética de Goiás: **Cabos Nus de Alumínio (CA)**. Goiânia, 2010.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais: **Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas**. Belo Horizonte, 2002.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais: **Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais**. Belo Horizonte, 2012.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais: **Instalações Básicas de Redes de Distribuição Compactas**. Belo Horizonte, 2012a.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais: **Instalação do Conjunto de Medição para Faturamento em Rede de Distribuição Aérea de 15 kV**. Belo Horizonte, 2012b.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais: **Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas**. Belo Horizonte, 2005.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais: **Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Rurais**. Belo Horizonte, 1985.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais: **Tabelas Práticas**. Belo Horizonte, 1991.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais: **Transformadores para Redes de Distribuição Aéreas 15 kV, 24,2 kV e 36,2 kV**. Belo Horizonte, 2009.

COSSI, A. M. **Planejamento de redes de distribuição de energia de média e baixa tensão**. Ilha Solteira, 2008, p. 232, Dissertação de Doutorado – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

DA COSTA, A. et al. Repotenciação de linhas de transmissão: aspectos técnicos e ambientais, **XVI Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Elétrica**, 6 p, Uberlândia, 2001.

DUALIBE, P., **Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteção**. Rio de Janeiro, 1999, 85 p. Apostila para Consultoria para Uso Eficiente de Energia – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

DUGAN, R. C., et al., **Electrical Power Systems Quality**. Nova York: McGraw Hill, 2012.

DUTRA, J. F. et al. Repotenciação e recapacitação de LTs de 230 kV através de novos cabos condutores e aumento da capacidade de carga dos suportes. A Experiência da Eletrosul, **XVIII Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Elétrica**, 6 p, Curitiba, 2005.

ENGELMIG. Engelmig Elétrica LTDA: **Cotação de preços de materiais**. Formiga, 2014.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: **Censo demográfico**. Belo Horizonte, 2013.

KAGAN, N., et al., **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. São Paulo: Blucher, 2010.

MARCELINO, A., PUCCI, B,R., NETO, D, B, R., SANTOS, D, J., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência aplicado na Subestação de Carajás 225 MVA**. 2009. 85 p. Dissertação (Título em Engenharia Elétrica) – Instituto Unificado de Ensino Superior Objetivo, IUESO, Goiás.

OLIVEIRA, C. M. F. **Recapacitação de linhas de transmissão**. Rio de Janeiro, 2000, p. 112, Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, P. S. **Methodological analysis to convert distribution lines from 34,5 kV to 69 kV**, São Carlos, 2010, p. 102. Master Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SILVA, R. P., BAUMANN, C. A. G. Repotenciação de linhas de transmissão: avaliação de novas tecnologias e concepções. **XIV Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Elétrica**. 6 p, Belém, 1997.

WERNECK, F., et al., Cai a média de moradores por domicílio. **Estado Brasil**, São Paulo, 21 set. 2012. Disponível em: <[http:// http://www.estadao.com.br](http://www.estadao.com.br)>. Acesso em: 21 dez. 2013.

ANEXO A – LEVANTAMENTO DE CAMPO NA SUBESTAÇÃO

Através do levantamento de campo pode-se realizar a planta baixa da entrada do sistema de transmissão na SE e a saída dos cinco alimentadores. Observa-se através da Figura 52 a saída dos alimentadores com as estruturas e postes de cada alimentador e as chaves facas, sendo que o azul é o alimentador três, o marrom é o alimentador quatro, o vermelho é o alimentador cinco, o preto é o alimentador seis e o verde é o alimentador sete.

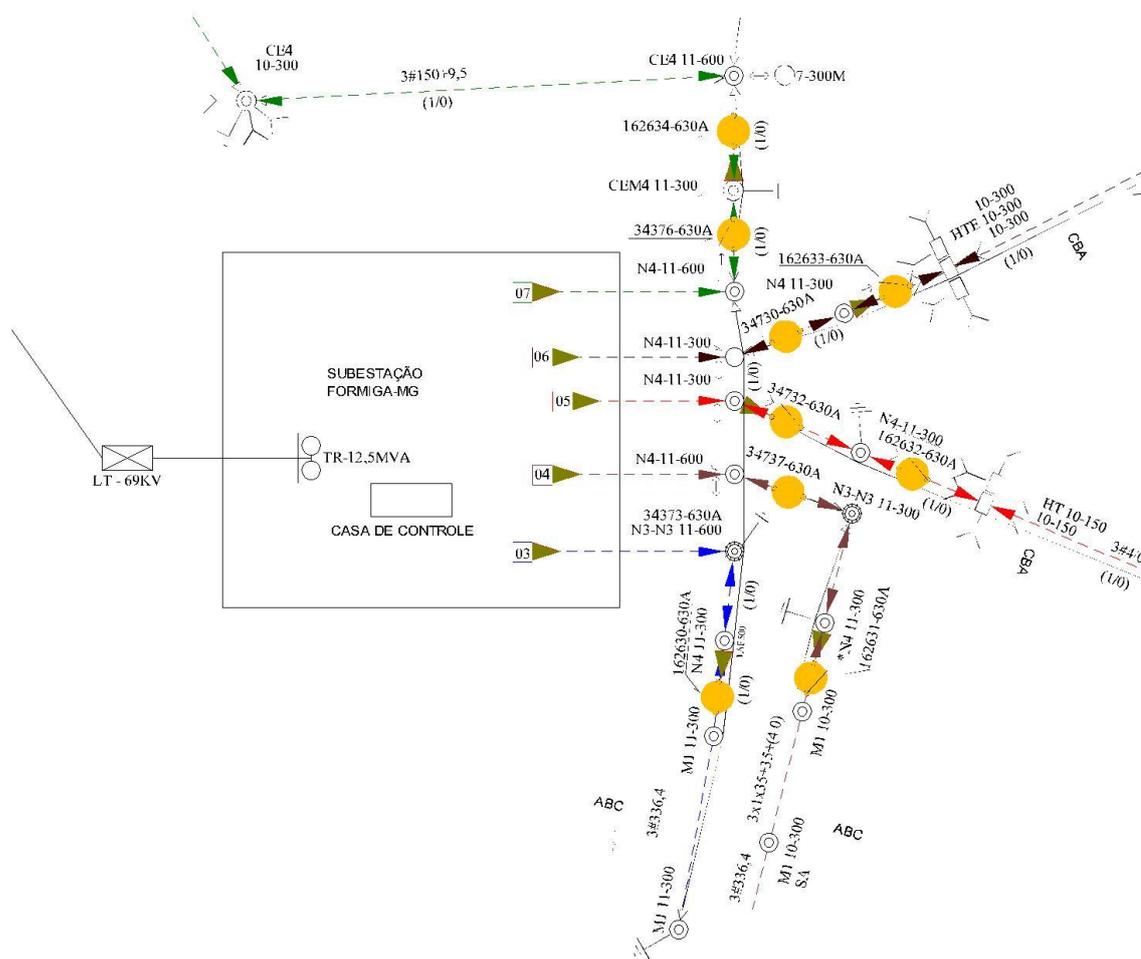


Figura 52 – Levantamento de Campo no entorno da SE.

ANEXO B – LEVANTAMENTO DE CAMPO – CHECK-LIST

O primeiro levantamento de campo foi realizado por todo o perímetro urbano e rural do alimentador três durante o período de dois meses. Através deste levantamento pode-se determinar o valor da potência instalada e o balanço entre as fases do alimentador. Para percorrer o alimentador e obter os dados criou-se um *check-list*, a Tabela 29 apresenta o perfil do *check-list* e os primeiros dados obtidos.

Tabela 29 – *Check-List* com os dados do primeiro levantamento.

Alimentador 3								
Número	Fases	Potência (KVA)	Número	Padronizado	Estrutura	Estai	Afastador	Poste
1	3 - ABC	45	20296	Sim	M2-11-300	Poste-Cruzeta	500	CC
2	3 - ABC	30	13314	Não	M1-11-300	Não	500	CC
3	1 - B	25	7517	Não	U2-11-300	Não	500	CC
4	1 - B	37	290352	Sim	U2-11-300	Não	500	CC
5	3 - ABC	45	375977	Não	M2-11-300	Não	Não	CC
6	3 - ABC	45	11271	Não	M1-11-600P	Não	Não	MC
7	3 - ABC	45	67368	Sim	CE3-11-600	Não	500	DT
8	3 - ABC	45	148005	Sim	CE3-11-600	Não	Não	DT
9	1 - A	37	72701	Sim	CM3-11-600	Não	500	DT
10	1 - A	15	380134	Sim	CM3-11-300	Não	500	DT
11	3 - ABC	75	32629	Não	BE1-11-300	Não	500	CC
12	3 - ABC	45	8378	Não	M3-11-300	Poste-Cruzeta	500	CC
13	3 - ABC	75	54565	Não	M1-11-300	Não	500	DT
14	3 - ABC	30	17201	Não	M1-11-300	Não	500	DT
15	3 - ABC	45	20375	Não	B1-11-300	Não	500	DT
16	3 - ABC	45	37987	Não	BE2-11-300	Não	500	DT
17	3 - ABC	75	P- 112033	-	Posto 1	Não	Não	CC
18	3 - ABC	75	57688	Não	M2-11-300	Não	500	CC
19	3 - ABC	75	12576	Não	CEM2-11-300	Não	500	CC
20	3 - ABC	112	282739	Não	CE3-11-600	Não	Não	CC
21	3 - ABC	45	30354	Sim	CEB2-11-300	Não	500	CC
22	3 - ABC	30	54020	Sim	M2-11-300	Poste-Cruzeta	500	DT
23	3 - ABC	75	61914	Não	M2-11-300	Poste-Cruzeta	500	CC
24	3 - ABC	75	26857	Sim	M2-11-300	Poste-Cruzeta	500	CC
25	3 - ABC	45	62483	Sim	CE3-12-300	Poste-Cruzeta	500	CC

ANEXO C – SEGUNDO LEVANTAMENTO DE CAMPO – CHECK-LIST

O segundo levantamento de campo foi realizado após determinar que o alimentador esta sobrecarregado. Este levantamento foi realizado por todo o perímetro urbano e 4 km de rural durante um mês. Através deste levantamento foi possível determinar as condições necessárias para utilização da técnica de recondutoramento. Criou-se o segundo *check-list* para este levantamento, a Tabela 30 apresenta o perfil do *check-list* e os primeiros dados obtidos.

Tabela 30 – *Check-List* com os dados do segundo levantamento.

Dados segundo levantamento						
VAN	VPO	Estrutura	Poste	Estai	Cabo	Poste
47,7	46,5	M1-10-300	CC	Não	336,4	1
46,5	36,3	M4-11-600	CC	Não	336,4	2
36,3	33,5	M1-11-300	CC	Não	336,4	3
33,5	34,7	M1-M2-11-300	CC	Não	336,4	4
42,2	41,5	M1-10-150	CC	Não	4	5
41,5	30	M1-10-150	CC	Não	4	6
30	-	M2-11-300	CC	CZ-POSTE	4	7
34,7	34,5	BE1-10-150	CC	Não	336,4	8
34,5	27,45	BE4-11-600	CC	Não	336,4	9
27,45	32,3	BE4-10-600	CC	Não	336,4	10
32,3	25,5	BE1-11-300	CC	Não	336,4	11
25,5	38,2	B1-11-300	CC	Não	336,4	12
38,2	32	B1-10-300	CC	Não	336,4	13
32	34,5	B1-B3-12-300	CC	Não	336,4	14
34,5	38,3	M4-11-300	CC	Não	1/0	15
38,3	45,3	M1-10-150	DT	Não	1/0	16
45,3	38,6	BE1-U3-11-300	DT	Não	1/0	17
37,9	32	U1-10-300M	MC	PO/PO	4	18
32	39,5	U1-U1-11-300	DT	Não	4	19
39,5	37,4	U2-U3-11-300	DT	Não	4	20
37,4	31	U1-10-150	CC	Não	4	21
31	29,8	U1-10-150	CC	Não	4	22
29,8	-	U2-11-300	CC	Não	4	23
31,8	-	U2-10-300M	MC	PO/PO	4	24
32	35,4	U1-10-300M	MC	Não	4	25
35,4	19,6	B1-10-150	CC	Não	4	26