

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALOCAÇÃO DE RELIGADORES NORMALMENTE
ABERTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

JAILSON AUGUSTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO

ITAJUBÁ, JULHO DE 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

JAILSON AUGUSTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO

**ALOCAÇÃO DE RELIGADORES NORMALMENTE
ABERTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

ORIENTADOR: DR. BENEDITO ISAIAS LIMA LOPES

Julho de 2017

Itajubá

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

JAILSON AUGUSTO OLIVEIRA DO NASCIMENTO

**ALOCAÇÃO DE RELIGADORES NORMALMENTE
ABERTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 07 de julho de 2017,
conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Engenharia
Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Benedito Isaias Lima Lopes. (Orientador)

Prof. Dr. Antônio Carlos Zambroni de Souza.

Prof. Dr. Adriano Batista de Almeida.

Itajubá

2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Elizete, e aos meus filhos Emílio e Júlia Inês. São pessoas fundamentais em minha vida que me incentivam a buscar ser uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por iluminar o meu caminho.

Ao professor Dr. Benedito Isaias Lima Lopes, pela compreensão e paciência na orientação deste trabalho.

Ao Mestre Luis Antonio Felber pelo incentivo.

Aos meus colegas de trabalho na CEMIG, pela compreensão.

À minha família, pelo apoio, paciência e compreensão.

RESUMO

Nesta dissertação é apresentada uma opção de cálculo para otimizar a alocação de religadores normalmente abertos. Para tanto, foram utilizados quatro alimentadores reais de um sistema de distribuição de energia elétrica. Inicialmente são escolhidos os lugares candidatos para receber os equipamentos e, em seguida, é utilizada uma equação que relaciona a confiabilidade dos sistemas envolvidos com a equação do DEC. Dessa forma, verifica-se a melhor escolha sendo o ponto que apresenta o maior potencial de melhoria da continuidade no fornecimento de energia elétrica. Finalmente, o lugar escolhido é aquele com o maior potencial de melhoria de desempenho para todo o sistema.

A fim de validar tecnicamente a viabilidade de instalação do religador normalmente aberto priorizado por meio da equação adotada, foi utilizado um programa de fluxo de potência. Nele se avaliou, na configuração normal do sistema elétrico em estudo e na configuração com carga transferida, o carregamento dos componentes da rede, os níveis de tensão, e as correntes de curto-circuito. A análise do carregamento dos componentes da rede garante a integridade do sistema. Os níveis de tensão foram avaliados a fim de garantir a qualidade do produto. E as correntes de curto-circuito foram avaliadas para o estudo da proteção do sistema em sua nova configuração após transferência de carga.

Keywords: “Self-healing”, religadores normalmente abertos, proteção de sistemas de distribuição, indicadores de continuidade.

ABSTRACT

In this dissertation a calculation option is presented to optimize the allocation of normally open reclosers. For this, four real feeders of an electric energy distribution system were used. Initially the candidate places are chosen to receive the equipment and then an equation is used that relates the reliability of the systems involved with the DEC equation. In this way, the best choice is the one that presents the greatest potential for improving the continuity in the electric power supply. Finally, the place chosen is one with the greatest potential for performance improvement for the entire system.

In order to technically validate the feasibility of installing the normally open recloser prioritized by means of the adopted equation, a power flow program was used. In the normal configuration of the electrical system under study and in the configuration with load transferred, it was evaluated the load of the network components, voltage levels, and short-circuit currents. Load analysis of network components ensures system integrity. Voltage levels were evaluated in order to guarantee product quality. And the short-circuit currents were evaluated for the study of the protection of the system in its new configuration after load transfer.

Keywords: Self-healing, reclosers normally open, protective distribution system, continuity indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Representação da Metodologia Utilizada.....	4
Figura 3-1 - Sequência de operação de um religador. (Eletropaulo, 2004).	6
Figura 3-2 – Interruptor e controle de um religador (Fonte: Schneider).	7
Figura 3-3 – Diagrama unifilar de um alimentador hipotético. (Fonte: Proposto pelo autor).	7
Figura 3-4 – Instalação de um religador NF no alimentador hipotético. (Fonte: Proposto pelo autor).	8
Figura 3-5 – Instalação de religador NF e NA no alimentador hipotético.	9
Figura 3-6 – Exemplo de recomposição automática (self-healing) utilizando religadores.	9
Figura 4-1 - Diagrama unifilar de um alimentador hipotético. (Fonte: Proposto pelo autor).....	14
Figura 4-2 – Instalação de religador NF e NA no alimentador hipotético.....	14
Figura 4-3 – Sistema com Dois Componentes Ligados em Série. (Fonte: (Sacramento, 2002)).....	15
Figura 5-1 – Traçado dos alimentadores com destaque para sedes municipais e equipamentos de proteção.	17
Figura 5-2 - Dados gerais do alimentador L10.	18
Figura 5-3 - Dados gerais do alimentador L12.	18
Figura 5-4 - Dados do alimentador M17.	19
Figura 5-5 - Dados do alimentador J10.	19
Figura 5-6 – Traçado dos alimentadores com destaque os religadores normalmente abertos a instalar.....	20
Figura 5-7 – Alimentadores importados para o programa PSSadep.	22
Figura 5-8 – Medição de corrente no alimentador L10. Fonte: Sistema de supervisão e controle.	23
Figura 5-9 - Medição na saída do alimentador L12. Fonte: Sistema de supervisão e controle.	23
Figura 5-10 - Medição na saída do alimentador J10. Fonte: Sistema de supervisão e controle.	24
Figura 5-11 - Medição na saída do alimentador M17. Fonte: Sistema de supervisão e controle.	24
Figura 5-12 – Imagem do programa PSSadep apresentado a forma de entrada de múltiplos da carga a fim de ajusta o carregamento do alimentador.	25
Figura 5-13 – Tela de configuração para diagnóstico de níveis de tensão e carregamento das redes.	26
Figura 5-14 – Alimentadores com o fluxo de potência no período de carga pesada. Na configuração normal dos alimentadores não foram identificados problemas de tensão.	26
Figura 5-15 – Alimentadores com o fluxo de potência no período de carga pesada. Na configuração normal dos alimentadores não foi identificada sobrecarga.	27
Figura 5-16 – Alimentadores com o fluxo de potência com a transferência das sedes municipais no período de carga pesada. A transferência da sede municipal “A” causa queda de tensão em grande parte do alimentador L12. A transferência da sede municipal “B” não causa.	28
Figura 5-17 – Alimentadores com o fluxo de potência com a transferência das sedes municipais no período de carga pesada. Não foi identificada sobrecarga nos componentes deste sistema elétrico durante esta simulação.	29
Figura 5-18 – Alimentadores com o fluxo de potência com a transferência da sede municipal “A” no período de carga leve. Mesmo durante a carga leve a transferência da sede municipal “A” causaria transgressão dos níveis de tensão considerados adequados.	30
Figura 5-19 – Ajustes no software para cálculo de curto-circuito.	31
Figura 5-20 – Resultados do cálculo de curto-circuito.....	32

Figura 5-21 – Coordenograma entre os ajustes do religador existente a montante do ponto indicado para instalação do religador 6 e os ajustes propostos para o religador 6.....	33
Figura I-1 - Representação gráfica das 10 subdivisões geográficas do IEEE. (Fonte: http://sites.ieee.org/r9/region-9/ consultado em 10/05/2017.	40
Figura II-1 – Chave Fusível. (Fonte: Internet).....	44
Figura II-2 – Religador tipo KF com comando hidráulico. (Fonte: Fotografia tirada em uma oficina de manutenção de uma distribuidora de energia).	45
Figura II-3 – Religador tipo OSM com controle microprocessado. Fabricante: Noja Power. Fonte: Noja Power (2008).....	47
Figura II-4 – Religador tipo OVR com controle microprocessado. Fabricante: ABB. Fonte: ABB (2010).....	47
Figura II-5 – Visão da tela inicial do software AFSuite. Fonte: Software baixado do site da ABB.	48
Figura II-6 – Esquema simplificado para regulação de tensão (Fonte: (Felber, 2015)).	50
Figura II-7 – Detalhes do regulador de tensão (Fonte: (Copel, 2010)).	50
Figura II-8 – Diagrama de ligação de um regulador monofásico em uma rede monofásica. (Fonte: (Copel, 2010)).....	51
Figura II-9 – Diagrama de ligação três reguladores de tensão ligados em estrela em um sistema trifásico. (Fonte: (Toshiba, 2012)).	51
Figura II-10 – Diagrama representando o acoplamento elétrico e magnético entre o primário e secundário de um regulador de tensão. (Fonte: (Toshiba, 2012)).....	52
Figura II-11 – Diagrama representando o acoplamento elétrico do regulador como elevador de tensão. (Fonte: (Toshiba, 2012)).....	52
Figura II-12 – Diagrama representando o acoplamento elétrico do regulador como abaixador de tensão. (Fonte: (Toshiba, 2012)).....	52
Figura II-13 – Diagrama representando a chave inversora (Fonte: (Toshiba, 2012)).	53
Figura II-14 – Diagrama representando a carga ligada no tap 1 (Fonte: (Toshiba, 2012)).	53
Figura II-15 – Diagrama representando o reator utilizado no regulador de tensão. (Fonte: (Toshiba, 2012)).	54
Figura II-16 – Descrição do arquivo extraído.....	56
Figura II-17 – Descrição do arquivo extraído.....	57
Figura II-18 – Descrição do arquivo extraído.....	57
Figura II-19 – Descrição do arquivo extraído.....	58
Figura II-20 – Descrição do arquivo extraído.....	59
Figura II-21 – Descrição do arquivo extraído.....	60
Figura II-22 – Descrição do arquivo extraído.....	61
Figura II-23 – Descrição do arquivo extraído.....	61
Figura II-24 – Descrição do arquivo extraído.....	62
Figura II-25 – Descrição do arquivo extraído.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1 - Dados necessários ao cálculo para comparação. (Coletados pelo autor).....	20
Tabela 5-2 – Valor das correntes utilizadas para ajustar o carregamento dos alimentadores no programa de fluxo de potência. (Coletados pelo autor).	25
Tabela 5-3 – Valores das correntes de curtos-circuitos calculadas.....	31
Tabela II-1 – Característica de condutores.....	42
Tabela II-2 – Limites de Tensão conforme PRODIST.....	63

LISTA DE SIGLAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica.

PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

ND: Norma de distribuição.

GIS: “Geographic Information System.”

IEEE: “Institute of Electrical and Electronic Engineers.”

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO	1
Relevância do Tema	1
Objetivos e Contribuições da Dissertação	2
Visão Geral e Estrutura do Trabalho	3
CAPÍTULO II	4
2. METODOLOGIA	4
CAPÍTULO III	6
3. RELIGADORES	6
Conclusão	10
CAPÍTULO IV	12
4. INDICADORES DE QUALIDADE E CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	12
INDICADORES DE QUALIDADE DO SERVIÇO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, CONFORME PRODIST	12
CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	14
Conclusão	16
CAPÍTULO V	17
5. PROPOSTA DE ALOCAÇÃO DE RELIGADORES NORMALMENTE ABERTOS	17
COMPARAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA INSTALAÇÃO DE RELIGADORES NORMALMENTE ABERTOS	17
Conclusão	33
CAPÍTULO VI	35
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	35
Conclusões	35
Sugestões para Trabalhos Futuros	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
ANEXOS	40
I. Submissão de Artigo na Revista IEEE R9	40
II. ESTUDO DO ALIMENTADOR	42
Condutores	42
Tipos de Redes Primárias	43
Equipamentos de Proteção	43

Equipamentos de Regulação.....	48
Classificação dos Consumidores.....	54
Ferramenta de Análise Utilizada.....	55
Descrição do Arquivo Obtido com o Extrator	55
LIMITES DE TENSÃO CONFORME PRODIST	63

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Relevância do Tema

As distribuidoras de energia elétrica precisam apresentar resultados de continuidade do fornecimento de energia elétrica cada vez melhores. Considerando que os recursos financeiros são finitos, as decisões sobre onde investir devem ser tomadas de forma otimizada.

Segundo Kondo (2015), “Atualmente, os órgãos reguladores do sistema elétrico têm imposto valores rigorosos de indicadores de continuidade às empresas de distribuição de energia. Essa imposição visa, principalmente, em condições de contingência, reduzir a duração e a frequência das interrupções no fornecimento da energia elétrica aos consumidores. As empresas de distribuição são penalizadas quando esses indicadores ultrapassam limites previamente fixados pelos órgãos reguladores. Nesse contexto, seguindo uma tendência mundial para melhorar a continuidade, sistemas modernos automatizados estão se disseminando cada vez mais nas redes elétricas de distribuição.”

De acordo com Silva (2010), “A Alocação e/ou realocação otimizada de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição de energia elétrica melhora a qualidade do serviço de fornecimento de energia e os índices de confiabilidade do sistema.”

A utilização de religadores tem impacto direto na melhoria dos resultados de continuidade do fornecimento de energia elétrica. Um religador normalmente aberto (NA) pode servir para transferir blocos de cargas importantes em casos de falhas permanentes nos sistemas de distribuição.

A utilização de religadores oferecem vantagens sobre a utilização de chaves. Mais de oitenta por cento das faltas em redes de distribuição são transitórias (CPFL, 2006). Além do benefício da transferência de um bloco de carga utilizando o religador normalmente aberto a ser instalado, caso ocorra uma falha transitória no circuito transferido o religador evitará uma interrupção sustentada.

Para Bandeirante (1987, p.13) “Os requisitos da adequada proteção aos equipamentos, da boa continuidade de serviço e do custo adequado ao sistema de distribuição em estudo,

frequentemente se revelam incompatíveis entre si. Dessa forma, o estudo da proteção exige a adoção de soluções de compromisso entre as exigências acima, visando a obtenção da melhor relação entre os benefícios técnicos obtidos e os custos referentes ao esquema adotado.”

A fim de otimizar a aplicação de recursos, é necessário identificar os melhores pontos para instalação de religadores. Como os sistemas de distribuição de energia elétrica são complexos, há uma infinidade de opções. Deve-se então utilizar um critério de comparação de benefícios para facilitar a escolha destes pontos. Há religadores normalmente fechados e normalmente abertos. Ambos possuem papel importante na melhoria do desempenho de qualidade de sistemas elétricos. Neste trabalho o foco é identificar em alimentadores reais o melhor ponto para instalar um religador normalmente aberto.

Inicialmente são escolhidos os lugares candidatos para receber o equipamento, em seguida, é utilizada uma equação que relaciona a confiabilidade dos sistemas envolvidos com a equação do DEC. Dessa forma, verifica-se a melhor escolha sendo o ponto que apresenta o maior potencial de melhoria da continuidade no fornecimento de energia elétrica. Finalmente, o lugar escolhido é aquele com o maior potencial de melhoria de desempenho para todo o sistema.

Após o processo de escolha dos pontos candidatos com maior potencial de melhoria na continuidade do fornecimento de energia elétrica, é verificada a viabilidade desta transferência de carga por meio de um programa de fluxo de potência, onde avalia-se o carregamento dos componentes da rede, os níveis de tensão, e as correntes de curto-circuitos. A análise do carregamento dos componentes da rede garante a integridade do sistema. Os níveis de tensão são avaliados a fim de garantir a qualidade do produto. E as correntes de curto-circuito são avaliadas para o estudo da proteção do sistema em sua nova configuração após transferência de carga.

Objetivos e Contribuições da Dissertação

Esta dissertação tem o objetivo de apresentar uma opção de método de priorização de instalação de religadores normalmente abertos em redes de distribuição. O religador normalmente aberto, caso seja telecontrolado, permite a transferência via telecontrole de blocos de carga. Isto tem impacto direto nos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Para a sociedade, o método apresentado, caso seja utilizado, contribuirá para melhoria do conforto da população. Ao maximizar a continuidade do fornecimento de energia elétrica,

a população terá as interrupções de energia minimizadas. A ideia é oferecer um sistema elétrico melhor, aplicando de forma otimizada uma tecnologia existente.

Para as concessionárias de energia elétrica, a contribuição será um apoio na melhoria do desempenho dos seus sistemas elétricos. Conseqüentemente este método ajudará as empresas a manterem suas concessões de distribuição de energia elétrica.

Para o meio-ambiente, a contribuição será a aplicação otimizada dos recursos. Assim será necessário aplicar menos equipamentos para atingir uma melhoria desejada no sistema elétrico. Ao utilizar menos equipamentos, haverá menor impacto ambiental na construção destes.

Por fim, este trabalho tem a pretensão de dar uma pequena contribuição para entregar à geração vindoura algo um pouco melhor do que a nossa geração recebeu.

Visão Geral e Estrutura do Trabalho

Esta dissertação é composta de sete capítulos mais anexos. No Capítulo I é realizada a introdução, onde consta a relevância do tema, a submissão de um artigo na revista IEEE região 9, os objetivos e contribuições, a visão geral e a estrutura da dissertação. No Capítulo II é apresentada a metodologia utilizada. No Capítulo III o equipamento a ser alocado é apresentado de forma sucinta. No capítulo IV são apresentados os indicadores de qualidade do serviço de distribuição de energia, conforme o PRODIST. No Capítulo V é abordado o tema Confiabilidade em sistemas de distribuição de energia elétrica. No Capítulo VI é apresentado o trabalho desenvolvido. No Capítulo VII são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Nos anexos constam um estudo sobre os alimentadores envolvidos na simulação.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGIA

A Figura 2-1 apresenta os passos da metodologia utilizada. Iniciou-se o trabalho com a pesquisa bibliográfica, nesta etapa foi possível verificar o funcionamento do religador e seus benefícios para o sistema elétrico de distribuição de energia elétrica. Então selecionou-se os pontos de interesse para instalação de religadores NA. Para escolha destes pontos o usuário precisa ter conhecimento prévio do sistema onde o religador será alocado. Posteriormente utilizou-se uma equação que relaciona a confiabilidade dos sistemas envolvidos a equação de DEC. Esta equação foi aplicada aos pontos de interesse escolhidos no passo anterior. Com os resultados desta equação verificou-se a melhor escolha entre os pontos escolhidos inicialmente de acordo com o potencial de melhoria da continuidade no fornecimento de energia elétrica. Finalmente, o lugar escolhido foi aquele com o maior potencial de melhoria de desempenho para todo o sistema.

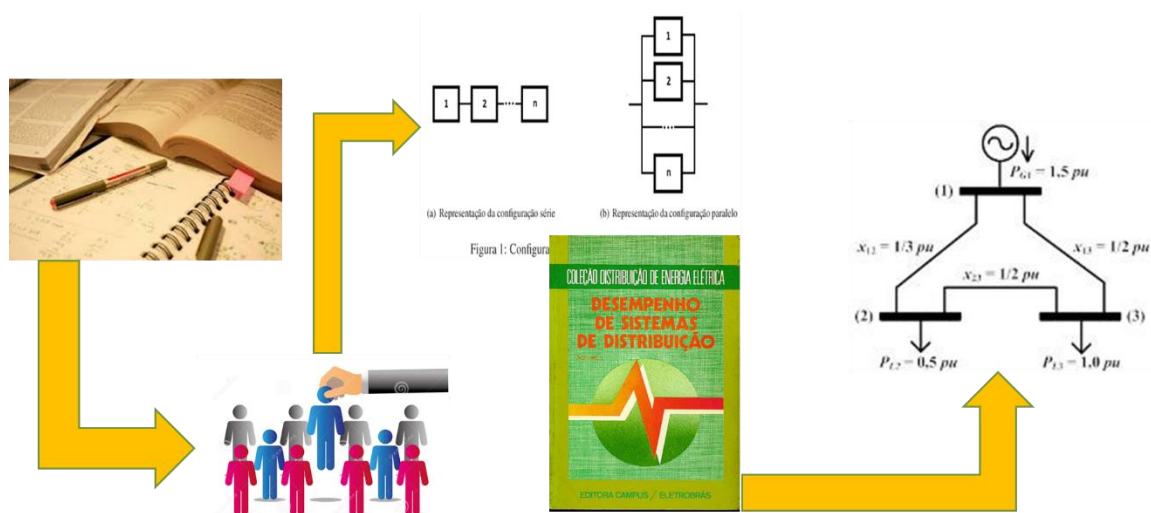


Figura 2-1 - Representação da Metodologia Utilizada.

A fim de validar tecnicamente a viabilidade de instalação do religador normalmente aberto priorizado por meio da equação apresentada, foi utilizado um programa de fluxo de potência. Nele se avaliou, na configuração normal do sistema elétrico em estudo e na configuração com carga transferida, o carregamento dos componentes da rede, os níveis de

tensão, e as correntes de curto-circuitos. A análise do carregamento dos componentes da rede garante a integridade do sistema. Os níveis de tensão foram avaliados a fim de garantir a qualidade do produto. E as correntes de curto-circuito foram avaliadas para o estudo da proteção do sistema em sua nova configuração após transferência de carga.

Todo o estudo foi realizado utilizando dados reais de um sistema de distribuição de energia elétrica. Para tanto, foram utilizados quatro alimentadores reais de um sistema de distribuição de energia elétrica. Por uma questão de segurança da informação, os nomes dos alimentadores em estudo foram trocados.

CAPÍTULO III

3. RELIGADORES

O religador é um equipamento de proteção e chaveamento de sistemas elétricos com várias funções, entre elas a função de religamento. É possível parametrizar quantas operações de abertura e fechamento ele realizará em caso de falhas no sistema elétrico que ele está protegendo. Considerando que mais de 80% das falhas em sistemas elétricos de distribuição são falhas transitórias (CPFL, 2006), o religador é um equipamento essencial para melhoria da continuidade do fornecimento de energia elétrica. Em casos de falhas transitórias, o religador irá religar restabelecendo o fornecimento de energia elétrica. Nos casos de falhas permanentes, ele realizará sua sequência de operação até realizar o bloqueio do fornecimento de energia elétrica. Neste último caso, a equipe de manutenção da concessionária de energia deverá manter o sistema elétrico e fechar o religador após esta manutenção. A Figura 3-1 representa a sequência de operação de um religador ajustado para 4 operações, sendo duas rápidas e duas lentas.

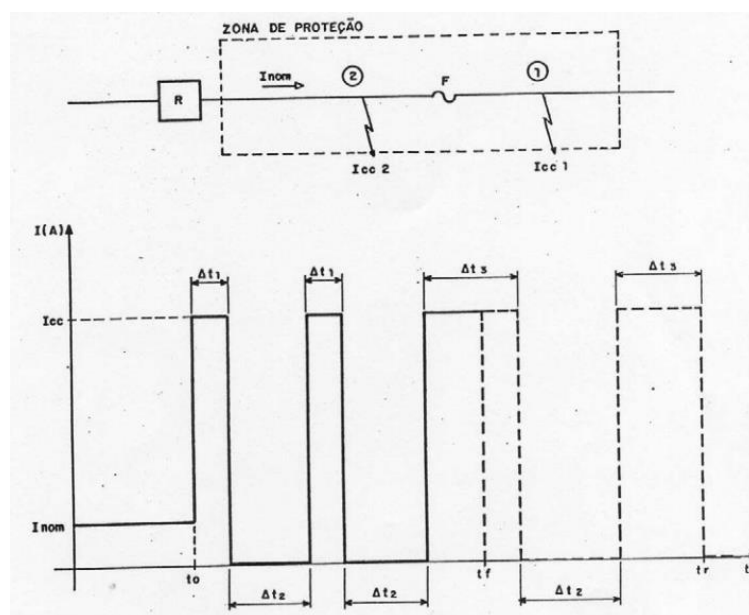


Figura 3-1 - Sequência de operação de um religador. (Eletropaulo, 2004).

No caso da Figura 3-1, caso ocorra uma falha no trecho protegido pelo religador, ele realizará quatro operações de abertura, com três religamentos. O bloqueio ocorrerá na quarta abertura caso a falha seja permanente. Por outro lado, caso a falha seja transitória, o fornecimento de energia elétrica será restabelecido pelo religamento do religador.

Na figura 3-1 é observa-se um fusível entre as falhas ICC1 e ICC2. “A coordenação entre um religador e um elo fusível é satisfatória quando o fusível não fundir enquanto o religador realiza as suas operações rápidas, mas fundir durante a primeira operação temporizada do religador” (Santos, 2012). Assim, caso ocorra uma falha transitória no trecho protegido pelo fusível, a curva rápida do religador restabelecerá o fornecimento de energia elétrica de forma automática.

Os religadores modernos possuem medição de corrente e tensão nas três fases. São controlados por meio de controles microprocessados. Com este controle é disponibilizada uma extensa lista de funcionalidades de proteção, automação e registro de dados. Toda a parametrização deste equipamento pode ser feita por meio de um computador conectado ao seu controle microprocessado. Cada fabricante oferece um software de parametrização (Nascimento, 2014). As Figuras abaixo são a chave e o controle de um religador.



Figura 3-2 – Interruptor e controle de um religador (Fonte: Schneider).

A seguir serão apresentados alguns exemplos de utilização de religadores e sua consequente melhoria na continuidade do fornecimento de energia elétrica. Para este fim é utilizado um alimentador hipotético que atende dez mil unidades consumidoras, conforme Figura 3-3.

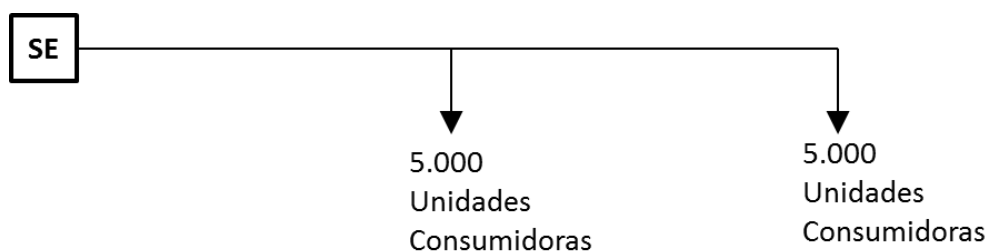


Figura 3-3 – Diagrama unifilar de um alimentador hipotético. (Fonte: Proposto pelo autor).

No caso de uma falha em qualquer ponto do alimentador apresentado da Figura 3-3, a proteção da saída da subestação atuará interrompendo o fornecimento de energia elétrica para todas as unidades consumidoras deste alimentador. Esta situação pode ser melhorada com a utilização de um religador normalmente fechado (NF), conforme representado na Figura 3-4.

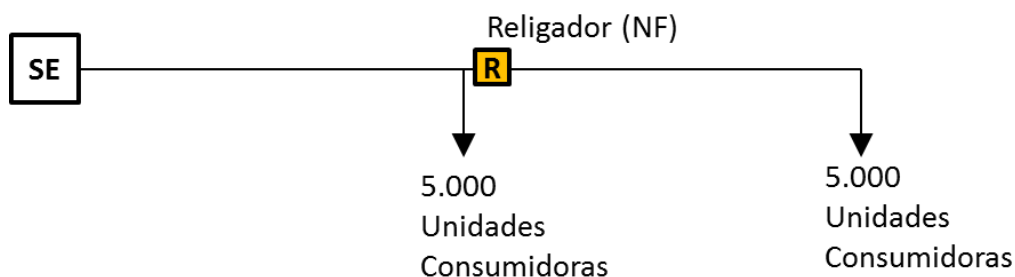


Figura 3-4 – Instalação de um religador NF no alimentador hipotético. (Fonte: Proposto pelo autor).

Considerando que o estudo de coordenação e seletividade entre as proteções da subestação e do religador instalado foram realizadas de forma adequada, nesta nova configuração, caso ocorra uma falha permanente a jusante do religador instalado, apenas as unidades consumidoras a jusante deste equipamento terão seu fornecimento de energia elétrica interrompida. Neste caso, o religador instalado no alimentador hipotético preservará o fornecimento de energia para metade deste alimentador.

A quantidade de religadores a serem utilizados em um alimentador é limitada pelas possibilidades de coordenação e seletividade destes equipamentos em série e também pela redução no benefício de novos equipamentos. Existe um ponto de saturação de religadores em que a instalação de um novo equipamento não causa melhoria significativa no sistema. Segundo (Kondo, 2010), “alimentadores com maiores índices DEC e FEC recebem mais dispositivos, até um determinado ponto de saturação. Essa saturação consiste no limite de melhoria dos valores dos indicadores que a instalação dos dispositivos proporciona”. E também existem situações onde não é mais possível inserir novos religadores por causa das limitações de coordenação entre estes equipamentos. “Para planejadores, evita-se a alocação de mais de três religadores em série, devido às dificuldades nos ajustes que garantem a operação coordenada da proteção.” (Kondo, 2010).

Para o caso da Figura 3-4, caso a falha ocorra antes do religador instalado todas as unidades consumidoras do alimentador terão o fornecimento de energia elétrica interrompida. O religador normalmente fechado instalado não melhoraria o desempenho de continuidade do fornecimento de energia elétrica neste caso. Seria interessante se houvesse

uma forma de transferir o bloco de cargas que não possui falha para outra fonte de alimentação. É possível melhorar esta situação com a instalação de um religador normalmente aberto (NA), conforme Figura 3-5.

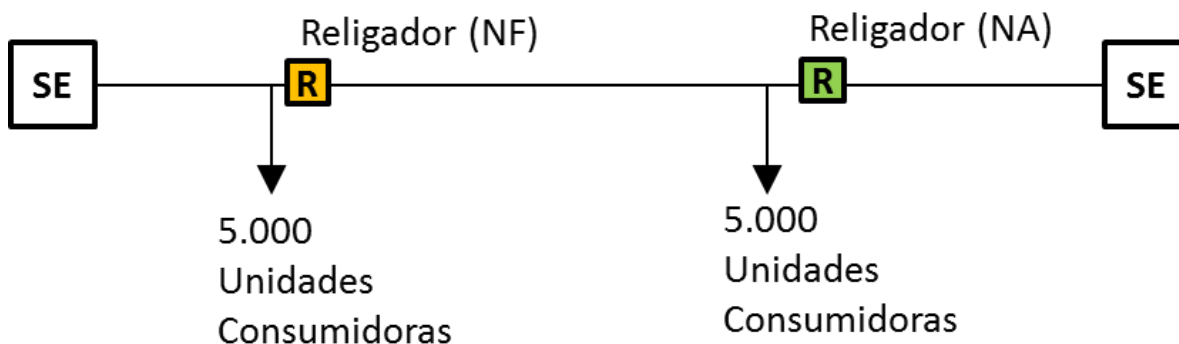


Figura 3-5 – Instalação de religador NF e NA no alimentador hipotético.

A situação apresentada na Figura 3-5 seria melhor ainda caso os religadores instalados fossem telecontrolados. Neste caso, a ocorrência de uma falha no primeiro trecho do alimentador, haveria possibilidade de transferência automática dos consumidores do segundo trecho por meio da abertura do religador NF e fechamento do religador NA.

No caso de trechos de rede que atendem consumidores especiais ou uma grande quantidade de unidades consumidoras, é possível realizar a recomposição automática dos sistemas de distribuição. Este recurso evitaria que estas unidades consumidoras fiquem sem energia nos casos de algumas falhas permanentes. Por exemplo, este recurso pode ser utilizado em um alimentador que atende uma sede municipal, conforme ilustrado na Figura abaixo. (Felber, 2015).



Figura 3-6 – Exemplo de recomposição automática (self-healing) utilizando religadores.

Neste caso, a ocorrência de uma falha entre a SE 1 e o religador NF, é possível estabelecer uma lógica em que o religadore NF abre devido à falta de tensão nas suas buchas de entrada e o religador NA fecha devido à ausência de tensão em suas buchas de saída, mantendo o fornecimento de energia elétrica para sede municipal por meio de outra fonte. Há várias possibilidades para programar esta lógica, podendo ser via software SCADA (Software control and data aquisition), pela parametrização dos religadores ou ainda por comunicação via rádio entre os religadores.

Além do benefício da transferência de alimentação elétrica da sede municipal utilizando o religador NA proposto na Figura 3-6, caso ocorra uma falha transitória no circuito transferido o religador evitará que ocorra uma interrupção sustentada por meio de seus religamentos.

Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas de forma simplificada as características e principais aplicações do equipamento de proteção de nome religador. Trata-se de um equipamento de proteção utilizado em sistemas elétricos de distribuição de energia. Ele é extremamente importante para seu desempenho e também para a segurança dos operadores e da população.

O religador monitora o sistema elétrico e o interrompe em casos de falha entre fases ou entre fases e terra. Ele religa o sistema elétrico após um tempo parametrizável a fim de verificar se a falha foi permanente ou transitória. No caso de falhas transitórias, o fornecimento de energia é restabelecido automaticamente. No caso de falhas permanentes, o sistema elétrico permanece desligado até a intervenção da equipe de manutenção da distribuidora de energia.

O próximo capítulo abordará os indicadores de qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica, conforme o PRODIST. Serão abordados os indicadores individuais: DIC (duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora) e FIC (frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em número de interrupções.). E também os indicadores coletivos: DEC (duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora) e FEC (frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções.). Também será tratado sobre confiabilidade em sistemas de distribuição de energia elétrica. Serão informados os modelos de sistemas de confiabilidade

possíveis e definido qual o modelo aplicável ao sistema em estudo. Além disso serão dados exemplos de melhoria de continuidade do fornecimento de energia elétrica utilizando os sistemas com religadores utilizados anteriormente.

CAPÍTULO IV

4. INDICADORES DE QUALIDADE E CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

INDICADORES DE QUALIDADE DO SERVIÇO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, CONFORME PRODIST

Os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (Aneel, 2012 – 1).

O módulo 8 do PRODIST tem o objetivo de estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado (Aneel, 2012 – 2). Para este trabalho será dada atenção aos indicadores relacionados com a qualidade do serviço, especificamente aos indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica. A seguir é apresentada a descrição dos índices considerados importantes para a análise proposta. (ANEEL, 2012).

Indicadores individuais: DIC e FIC.

DIC = duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora.

FIC = frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em número de interrupções.

As equações (1) e (2) permitem a apuração dos indicadores individuais.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (1)$$

$$FIC = n \quad (2)$$

Onde,

i = índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a n ;

$t(i)$ = tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração;

n = número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração;

Por exemplo, uma unidade consumidora que teve cinco interrupções no ano com durações de 1,10 h, 2,00 h, 2,50 h, 3,00 h e 1,50 h teve um DIC de 10,10 h e FIC = 5.

Indicadores coletivos: DEC e FEC.

DEC = duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora;

FEC = frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções;

As equações (3) e (4) permitem a apuração dos indicadores coletivos.

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c} \quad (3)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} FIC(i)}{C_c} \quad (4)$$

Onde,

i = índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT faturadas do conjunto;

C_c = número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT ou MT.

DIC = duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora.

FIC = frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em número de interrupções.

Por exemplo, para um conjunto de 1000 unidades consumidoras, houve as seguintes interrupções no período de apuração: 3 h para 500 unidades + 2 h para 300 unidades, o DEC seria $(DEC = ((3*500+2*300)/1000)) = 2,10$ horas. Ou seja, cada unidade consumidora deste conjunto ficou em média 2,10 horas desligada. O FEC seria $(FEC = ((500+300)/1000)) = 0,80$. Ou seja, cada unidade consumidora deste conjunto foi desligada em média 0,80 vezes.

A melhoria no DEC causada pela instalação de religadores pode ser verificada a partir da observação dos alimentadores propostos nas figuras 4-1 e 4-2. No caso de uma falha permanente próximo do final do alimentador da figura 4-1, causando uma interrupção de 3 horas, o DEC causado por esta interrupção seria de $((3*10000)/10000)$ 3 horas. A mesma falha no alimentador da figura 4-2 teria um DEC de $((3*5000)/10000)$ 1,5 horas.

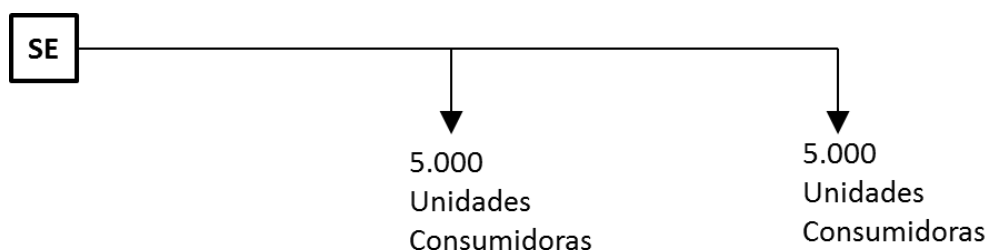


Figura 4-1 - Diagrama unifilar de um alimentador hipotético. (Fonte: Proposto pelo autor).

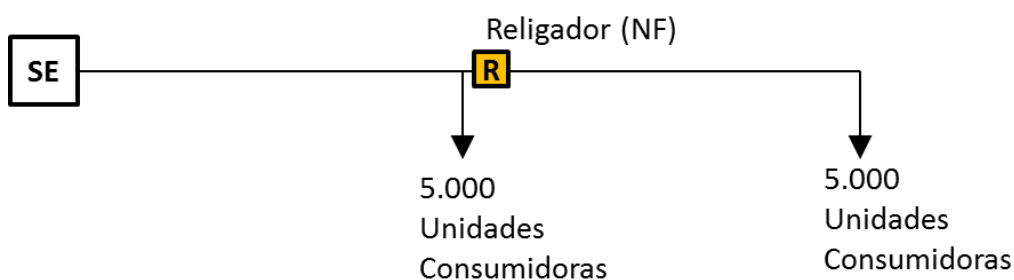


Figura 4-2 – Instalação de religador NF e NA no alimentador hipotético.

CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Conforme (Sacramento, 2002), pode-se avaliar a confiabilidade em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando-se o sistema série ou o sistema paralelo. Do ponto de vista da confiabilidade, um conjunto de componentes constitui um sistema série, se para o mesmo funcionar, todos os componentes devem obrigatoriamente estar em funcionamento. Já no caso do sistema paralelo, para o mesmo funcionar, é necessário que apenas um dos componentes esteja em funcionamento. No caso estudado nesta dissertação, os sistemas elétricos são radiais, logo são melhores representados pelo sistema série. Este sistema é apresentado na Figura 4-1.

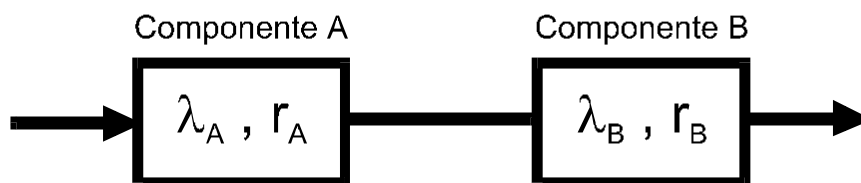


Figura 4-3 – Sistema com Dois Componentes Ligados em Série. (Fonte: (Sacramento, 2002)).

Na Figura 4-1 o sistema série é composto pelos componentes A e B. Consideram-se as taxas de falha como sendo λ_A e λ_B e os tempos de reparo como r_A e r_B . A taxa de falha equivalente deste sistema é dada pela equação (5) (Sacramento, 2002).

$$\lambda_S = \lambda_A + \lambda_B \quad (5)$$

E o tempo de reparo equivalente, pela equação (6).

$$r_S = \frac{\lambda_A r_A + \lambda_B r_B}{\lambda_S} \quad (6)$$

Neste trabalho foram utilizados quatro alimentadores reais do sistema de distribuição. Os trechos de interesse foram analisados como sistemas série. Cada quilômetro km de rede foi considerado um componente do sistema. Assim, a taxa de falha do trecho de interesse é dada pelo produto da taxa de falha por km pela quantidade de km, este cálculo é apresentado pela equação (7).

$$\lambda_S = \lambda_{km} * l \quad (7)$$

O tempo de indisponibilidade de sistema, dado em horas, pode ser calculado da seguinte forma, equação (8).

$$U_S = \lambda_S * r_s \quad (8)$$

Ao se associar as equações de DEC com as equações de confiabilidade, pode-se encontrar o DEC esperado para o sistema em estudo:

$$DEC_{esp} = \frac{U_s * Ca}{Cc} \quad (9)$$

Onde Ca são os consumidores atingidos pela indisponibilidade do sistema.

Conclusão

Este capítulo abordou os indicadores de qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica, conforme o PRODIST. Foram abordados os indicadores individuais: DIC e FIC. E também os indicadores coletivos: DEC e FEC.

Foi apresentado um exemplo de cálculo para os indicadores coletivos, que possuem relação direta com a metodologia apresentada neste trabalho.

Também foi apresentado sobre confiabilidade em sistemas de distribuição de energia elétrica. Posteriormente definiu-se o modelo de confiabilidade aplicável ao sistema em estudo.

Foram utilizados quatro alimentadores reais do sistema de distribuição. Os trechos de interesse foram analisados como sistemas série. Cada km de rede foi considerada um componente do sistema. Assim, a taxa de falha do trecho de interesse foi dada pelo produto da taxa de falha por km pela quantidade de km de cada alimentador estudado.

O próximo capítulo tratará do trabalho desenvolvido. Será feita a comparação dos benefícios da instalação de religadores Normalmente Abertos (NA) utilizando uma equação adotada e a partir de seus resultados apontado o ponto com maior potencial de melhoria na continuidade do fornecimento de energia elétrica. Após esta escolha será avaliado, por meio de um programa de fluxo de potência, se os pontos escolhidos são tecnicamente viáveis.

CAPÍTULO V

5. PROPOSTA DE ALOCAÇÃO DE RELIGADORES NORMALMENTE ABERTOS

COMPARAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DA INSTALAÇÃO DE RELIGADORES NORMALMENTE ABERTOS

Por uma questão de segurança da informação, os nomes dos alimentadores em estudo foram trocados. Os nomes para os alimentadores em estudos foram escolhidos de forma aleatória utilizando códigos alfanuméricos. Os nomes dados foram os seguintes: L10, L12, M17 e J10. Os alimentadores J10 e L10 atendem sedes municipais. Os alimentadores L12 e M17 possuem chaves normalmente abertas que podem receber a transferências das cargas das sedes municipais em caso de necessidade operativa. A Figura abaixo apresenta o traçado dos alimentadores e destaca as sedes municipais citadas.

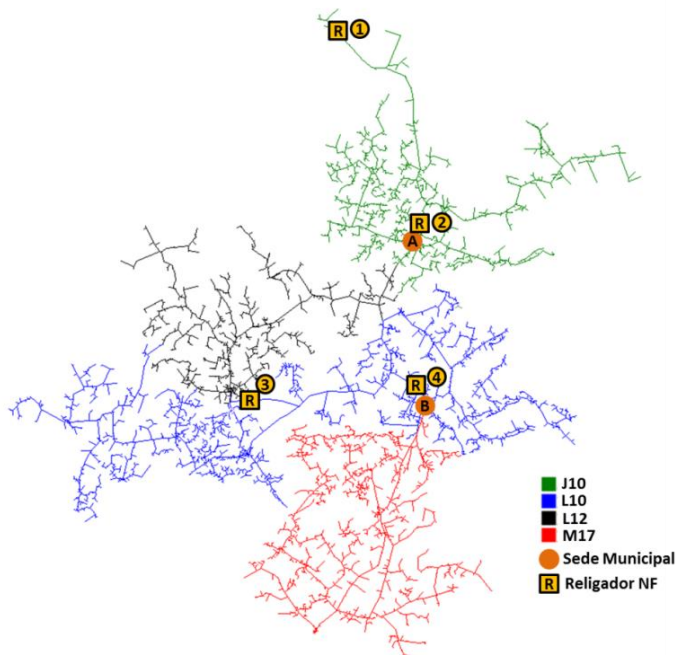


Figura 5-1 – Traçado dos alimentadores com destaque para sedes municipais e equipamentos de proteção.

O alimentador L10 é responsável pelo fornecimento de energia elétrica para 7.829 unidades consumidoras. Possui um comprimento total de 609,27 km. Na Figura 5-2 podem ser observados os dados gerais deste alimentador.

Dados Gerais				Extensão por Tipo de Rede (Km)			
Comprimento Total	609,27	Km	Rede Urbana		Rede Rural		
Comprimento do Tronco	3,14	Km	Convencional	21,41	Convencional	582,42	
Comprimento dos Ramais	606,13	Km	Protegida	4,40	Protegida	1,04	
Número de Trafos	1349		Isolada	0,0	Isolada	0,0	
Demanda Total	3346	kVA	Subterrânea	0,0	Subterrânea	0,0	
Perdas Totais	21,9	%					
Número de Equipamentos				Carga Instalada (kVA)			
Reguladores	3	Capacitores	0	Distribuída	3022	Rural	11572
Religadores	16	Seccion.	1	Concentrada	75	Total	14669
CH Fusível	128	CH Tripolares	0				
CH Unipolares	58	CH Trip. - CR	0				
Auto-Trafo	1	Pt Trafo 34,5kV	0	Número de Clientes			
				Secundários	4182	Rurais	3646
				Primários	1	Total	7829

Figura 5-2 - Dados gerais do alimentador L10.

O alimentador L12 é responsável pelo fornecimento de energia elétrica para 6.593 unidades consumidoras. Possui um comprimento total de 559,01 km. Na Figura 5-3 podem ser observados os dados gerais deste alimentador.

Dados Gerais				Extensão por Tipo de Rede (Km)			
Comprimento Total	559,01	Km	Rede Urbana		Rede Rural		
Comprimento do Tronco	5,98	Km	Convencional	19,40	Convencional	528,48	
Comprimento dos Ramais	553,03	Km	Protegida	6,76	Protegida	4,36	
Número de Trafos	1101		Isolada	0,0	Isolada	0,0	
Demanda Total	1952	kVA	Subterrânea	0,0	Subterrânea	0,0	
Perdas Totais	3,8	%					
Número de Equipamentos				Carga Instalada (kVA)			
Reguladores	2	Capacitores	0	Distribuída	3145	Rural	7211
Religadores	14	Seccion.	1	Concentrada	0	Total	10356
CH Fusível	126	CH Tripolares	0				
CH Unipolares	31	CH Trip. - CR	0				
Auto-Trafo	0	Pt Trafo 34,5kV	0	Número de Clientes			
				Secundários	4763	Rurais	1830
				Primários	0	Total	6593

Figura 5-3 - Dados gerais do alimentador L12.

O alimentador M17 é responsável pelo fornecimento de energia elétrica para 4.257 unidades consumidoras. Possui um comprimento total de 730,43 km. Na Figura 5-4 podem ser observados os dados gerais deste alimentador.

Dados Gerais		Extensão por Tipo de Rede (Km)			
Comprimento Total	730,43 Km	Rede Urbana		Rede Rural	
Comprimento do Tronco	3,84 Km	Convencional	10,08	Convencional	714,62
Comprimento dos Ramais	726,58 Km	Protegida	5,31	Protegida	0,23
Número de Trafos	1405	Isolada	0,0	Isolada	0,0
Demanda Total	1370 kVA	Subterrânea	0,0	Subterrânea	0,0
Perdas Totais	4,8 %				
Número de Equipamentos		Carga Instalada (kVA)			
Reguladores	3	Capacitores	2	Distribuída	1816
Religadores	13	Seccion.	0	Concentrada	600
CH Fusível	298	CH Tripolares	0	Rural	11020
CH Unipolares	43	CH Trip. - CR	0	Total	13436
Auto-Trafo	0	Pt Trafo 34,5kV	0		
		Número de Clientes			
		Secundários	2060	Rurais	2195
		Primários	2	Total	4257

Figura 5-4 - Dados do alimentador M17.

O alimentador J10 é responsável pelo fornecimento de energia elétrica para 7.918 unidades consumidoras. Possui um comprimento total de 661,71 km. Na Figura 5-5 podem ser observados os dados gerais deste alimentador.

Dados Gerais		Extensão por Tipo de Rede (Km)			
Comprimento Total	661,71 Km	Rede Urbana		Rede Rural	
Comprimento do Tronco	35,32 Km	Convencional	26,64	Convencional	625,19
Comprimento dos Ramais	626,38 Km	Protegida	9,59	Protegida	0,27
Número de Trafos	1383	Isolada	0,0	Isolada	0,0
Demanda Total	2924 kVA	Subterrânea	0,0	Subterrânea	0,0
Perdas Totais	23,6 %				
Número de Equipamentos		Carga Instalada (kVA)			
Reguladores	4	Capacitores	1	Distribuída	3707
Religadores	16	Seccion.	0	Concentrada	0
CH Fusível	198	CH Tripolares	0	Rural	10681
CH Unipolares	34	CH Trip. - CR	0	Total	14388
Auto-Trafo	0	Pt Trafo 34,5kV	0		
		Número de Clientes			
		Secundários	5178	Rurais	2740
		Primários	0	Total	7918

Figura 5-5 - Dados do alimentador J10.

O objetivo é comparar entre duas opções de instalação de religadores NA e qual deles traz melhor benefício em termos de melhoria na continuidade do fornecimento de energia elétrica para o sistema em estudo. A Figura 5-6 apresenta a localização dos dois religadores normalmente abertos que são comparados. A cidade “A” é alimentada normalmente pelo alimentador J10, a proteção de sua entrada é feita pelo religador número 2, a montante do religador número 2 está instalado o religador número 1. Se ocorrer uma falha entre o religador número 1 e o religador número 2 a cidade “A” terá seu fornecimento de energia

interrompido. A instalação do religador número 5 proporcionaria à cidade “A” uma opção de transferência automática de suas cargas para outro alimentador. A mesma análise serve para a cidade B, porém com seus respectivos religadores.

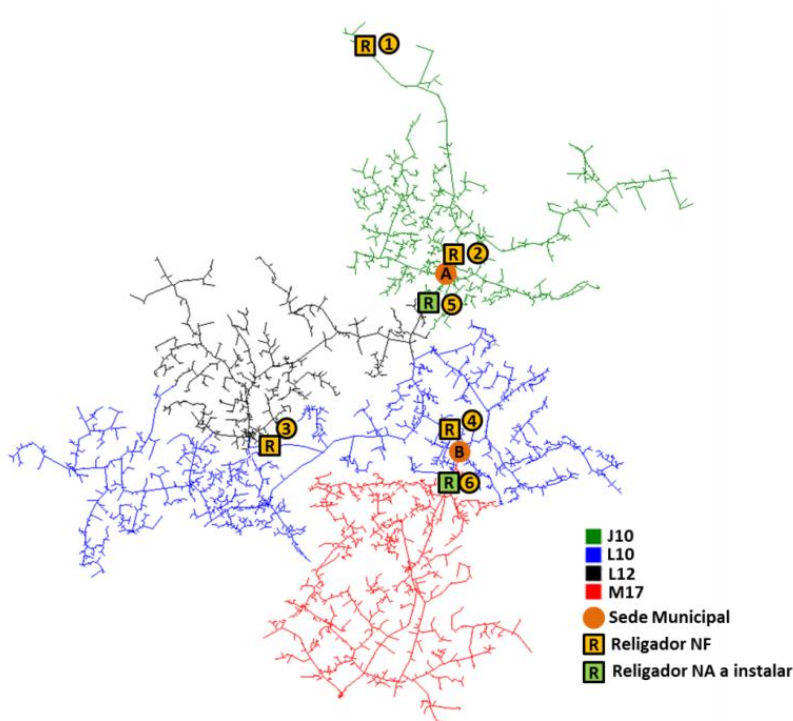


Figura 5-6 – Traçado dos alimentadores com destaque dos religadores normalmente abertos a instalar.

A taxa de falha de cada alimentador foi encontrada a partir do total de falhas em um ano dividido pela extensão total do alimentador. Assim a taxa de falha é dada por quilômetro de alimentador. A Tabela 5-1 apresenta os dados necessários ao cálculo para a verificação de qual o religador proposto possui maior benefício potencial.

Tabela 5-1 - Dados necessários ao cálculo para comparação. (Coletados pelo autor).

Cidade	Nº de Unidades Consumidoras Atingidas (Ca)	Extensão de Rede Entre Religadores a Montante (l)	Taxa de Falha (λ)	Tempo de Reparo (r)	Consumidores do Conjunto (Cc)
A	4.335	44,07 Km	0,07	3 h	11.386
B	2.628	36,23 Km	0,09	3 h	8.679

Com as informações da Tabela 5-1 é possível calcular o DEC esperado para cada cidade. A escolha pela realização da instalação será pelo religador que atenda a cidade que apresentar o maior DEC esperado. Assim, pode-se utilizar o religador normalmente aberto para transferir a alimentação da cidade e melhorar a continuidade do fornecimento de energia

elétrica. Esta transferência pode ser automática ou manual, dependendo da tecnologia disponível.

Utilizando-se a equação 9, a seguir é explicitado os cálculos do DEC esperado para a cidade “A” e “B”.

DEC esperado para a cidade “A”:

$$\begin{aligned} DEC_{esp(A)} &= \frac{U_s * Ca}{Cc} = \frac{\lambda_s * r_s * Ca}{Cc} = \frac{\lambda_{km} * l * r_s * Ca}{Cc} \\ &= \frac{0,07 * 44,07 * 3 * 4.335}{11.386} = 3,52 \end{aligned}$$

DEC esperado para a cidade “B”:

$$\begin{aligned} DEC_{esp(B)} &= \frac{U_s * Ca}{Cc} = \frac{\lambda_s * r_s * Ca}{Cc} = \frac{\lambda_{km} * l * r_s * Ca}{Cc} \\ &= \frac{0,09 * 36,23 * 3 * 2.628}{8.679} = 2,96 \end{aligned}$$

Conforme os cálculos obtidos, considerando como critério a melhoria na continuidade de fornecimento de energia elétrica, o religador número 5 seria priorizado em relação ao religador número 6.

Além de verificar o equipamento que oferece o melhor benefício na continuidade do fornecimento, é importante ressaltar que a viabilidade desta transferência de carga deve ser analisada por meio de um programa de fluxo de potência, onde deverão ser avaliados o carregamento dos componentes da rede, os níveis de tensão, e as correntes de curto-circuito. Para esta análise foi utilizado o programa PSSadep.

Para a realização desta análise no programa de fluxo de potência é necessário inicialmente importar os dados do sistema georreferenciado da distribuidora para o programa de fluxo. Depois é necessário coletar e analisar as medições de todos os alimentadores envolvidos na análise. Deve-se então utilizar as medições analisadas para o ajuste das cargas

dos alimentadores, a fim da simulação ficar a mais próxima possível da realidade. Pode-se então realizar o cálculo de fluxo de potência no sistema em estudo, analisando níveis de tensão no sistema na configuração normal. Posteriormente realiza-se as transferências desejadas e verifica-se o comportamento do sistema elétrico nesta nova configuração. Na Figura 5-7 é possível observar o traçado dos alimentadores na tela deste programa.

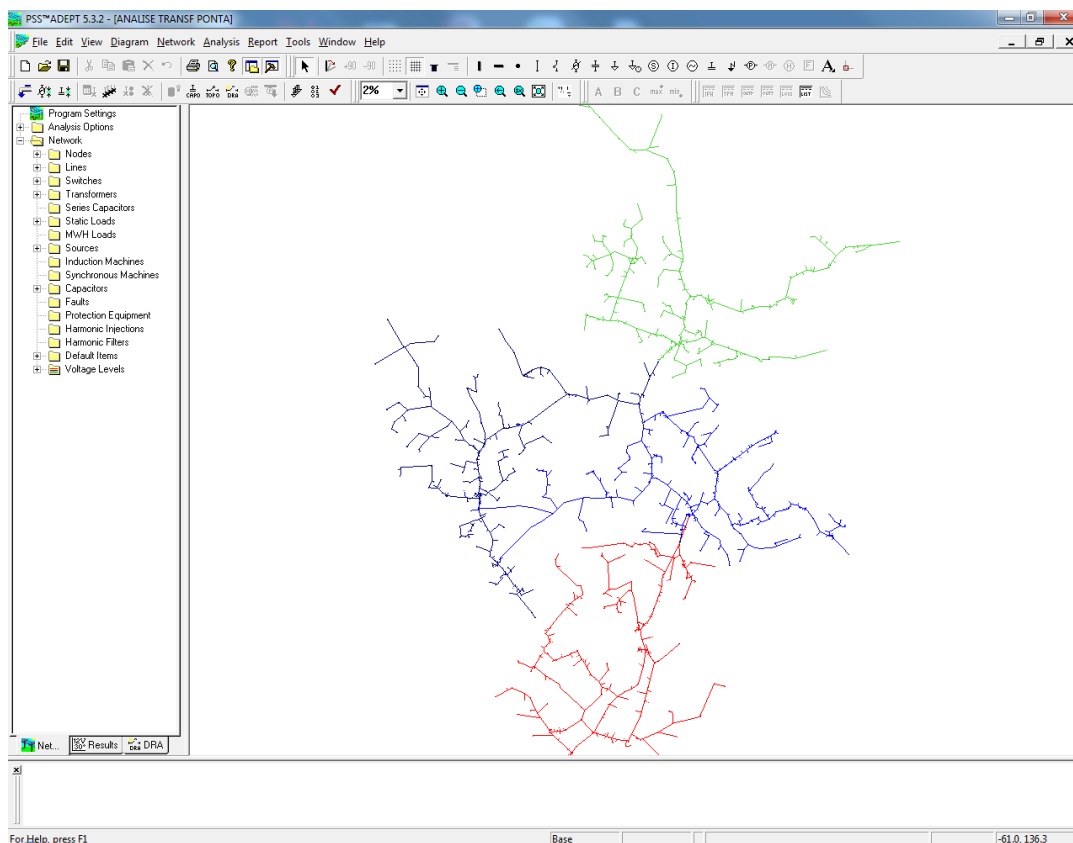


Figura 5-7 – Alimentadores importados para o programa PSSadept.

A fim de tornar a simulação mais precisa, o carregamento dos alimentadores foi ajustado no programa, conforme medições coletadas no sistema de supervisão e controle. Nas Figuras 5-8 a 5-11 são apresentadas as medições de corrente dos alimentadores L10, L12, J10 e M17, respectivamente. Estas medições foram utilizadas para ajustar o caso a ser estudado no programa de fluxo de potência. A partir da curva de carregamento pode-se dividir o dia em três períodos de carga, sendo carga leve de 00h até 07h, carga média de 07h até 17h e carga pesada de 17h até 21h. Das 21h as 24h a carga volta ao patamar da carga média.

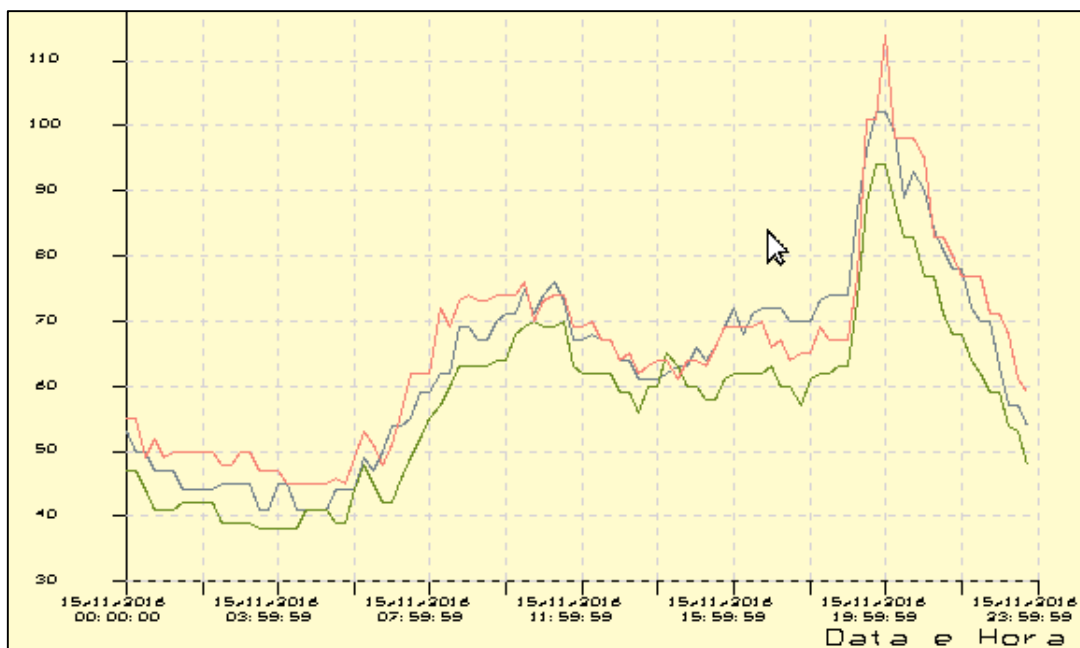


Figura 5-8 – Medição de corrente no alimentador L10. Fonte: Sistema de supervisão e controle.



Figura 5-9 - Medição na saída do alimentador L12. Fonte: Sistema de supervisão e controle.

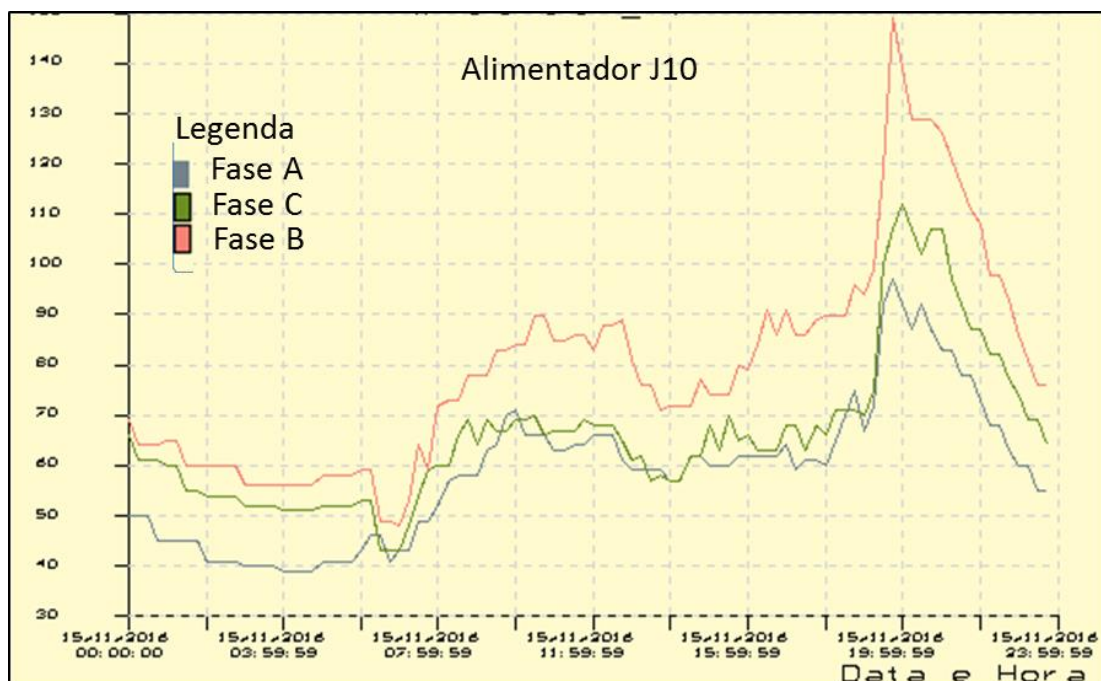


Figura 5-10 - Medição na saída do alimentador J10. Fonte: Sistema de supervisão e controle.

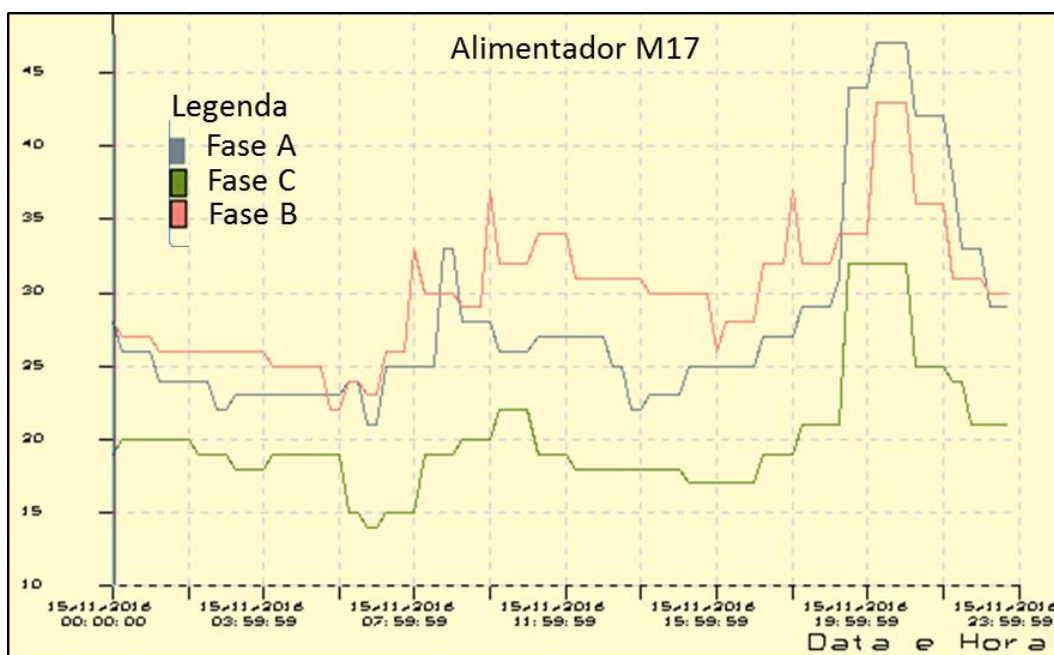


Figura 5-11 - Medição na saída do alimentador M17. Fonte: Sistema de supervisão e controle.

As medições de cada alimentador foram analisadas de forma a obter o maior carregamento que cada alimentador poderia chegar em cada período de carga. A partir desta análise foi possível chegar aos valores da Tabela 5-2, onde são informados os valores de correntes utilizadas para o ajuste de cargas no programa de fluxo de potência.

Tabela 5-2 – Valor das correntes utilizadas para ajustar o carregamento dos alimentadores no programa de fluxo de potência. (Coletados pelo autor).

L10	LEVE	MÉDIA	PESADA
A	45	76	102
B	50	74	114
C	39	69	94

L12	LEVE	MÉDIA	PESADA
A	45	54	89
B	43	54	87
C	42	53	88

J10	LEVE	MÉDIA	PESADA
A	39	69	92
B	56	86	139
C	51	69	112

M17	LEVE	MÉDIA	PESADA
A	23	26	47
B	25	32	43
C	19	22	32

O próximo passo executado foi o ajuste da carga dos alimentadores no programa de fluxo de potência. Realizou-se este ajuste por meio de multiplicadores de carga. A primeira simulação foi realizada no período de carga pesada. A Figura 5-12 mostra a tela onde são inseridos os multiplicadores para o ajuste da carga. A primeira linha da figura abaixo informa a fase do sistema em estudo, sendo a primeira coluna o total da carga, a segunda coluna as cargas da fase A, a terceira coluna as cargas da fase B e a quarta coluna as cargas da fase C. As linhas abaixo destes títulos informam os valores da potência ativa (P), Potência Reativa (Q), Potência Aparente (S) e fator de potência (pf). Os quadros brancos na parte inferior da figura servem para entrada dos multiplicadores que serão aplicados a todas as cargas do alimentador selecionado.

Number of loads selected: 481				
	Total	Phase A	Phase B	Phase C
P =	2826.14 kW	1104.33 kW	1006.65 kW	715.16 kW
Q =	1202.44 kvar	469.95 kvar	428.33 kvar	304.16 kvar
S =	3071.31 kVA	1200.16 kVA	1093.99 kVA	777.16 kVA
pf =	0.9202 Lag	0.9201 Lag	0.9202 Lag	0.9202 Lag
	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="text" value="0.58"/>	<input type="text" value="0.68"/>	<input type="text" value="0.80"/>

Figura 5-12 – Imagem do programa PSSadept apresentado a forma de entrada de múltiplos da carga a fim de ajusta o carregamento do alimentador.

Após ajustar as cargas de todos os alimentadores foi realizado o cálculo de fluxo de potência. É possível fazer um diagnóstico verificando níveis de tensão e carregamentos das redes. A Figura 5-13 apresenta a janela onde é possível configurar os parâmetros para este diagnóstico.

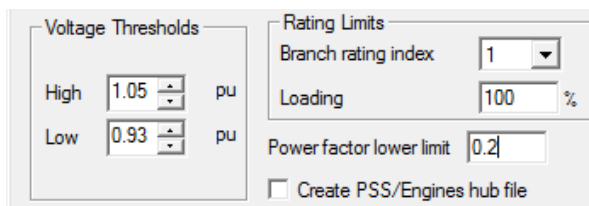


Figura 5-13 – Tela de configuração para diagnóstico de níveis de tensão e carregamento das redes.

Da forma como foi configurado, o programa apontará trechos com tensões superiores a 1,05 pu e inferiores a 0,93 pu como tensões indesejadas. E fará o mesmo com condutores de equipamentos que ultrapassem suas correntes nominais. Os níveis de tensão foram ajustados desta forma a fim de atender os limites de níveis de tensão estabelecidos no módulo 8 do PRODIST (Aneel, 2012 – 2). Os limites de carregamento foram ajustados com o objetivo de indicar se algum trecho do alimentador ultrapassar seu limite de carregamento.

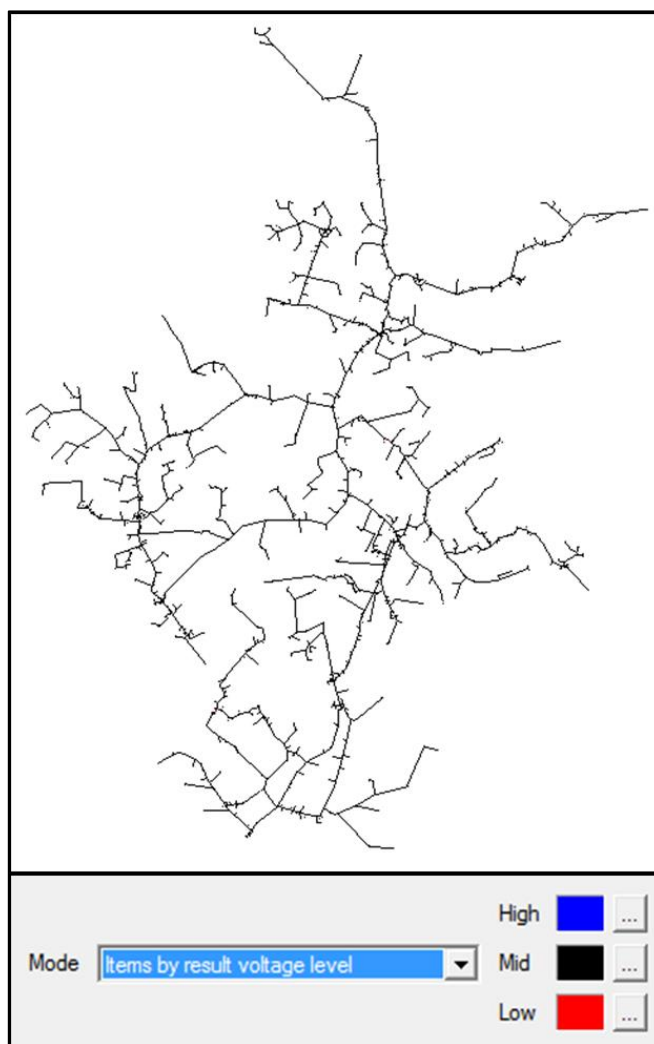


Figura 5-14 – Alimentadores com o fluxo de potência no período de carga pesada. Na configuração normal dos alimentadores não foram identificados problemas de tensão.

A Figura 5-14 mostra todos os alimentadores na cor preta. Isto indica que, no momento de carga pesada, antes da transferência não há problemas de tensão no sistema elétrico em estudo.

A Figura 5-15 mostra todos os alimentadores na cor preta. Isto indica que, no momento de carga pesada, antes da transferência não há sobrecarga no sistema elétrico em estudo.

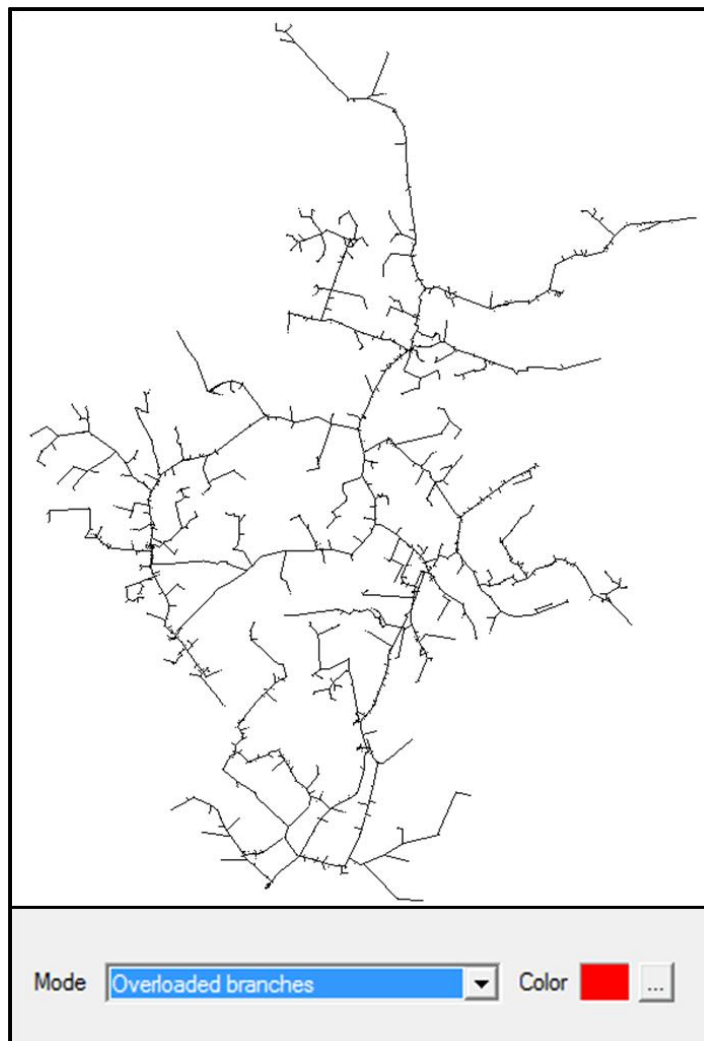


Figura 5-15 – Alimentadores com o fluxo de potência no período de carga pesada. Na configuração normal dos alimentadores não foi identificada sobrecarga.

Considerando que não foram identificados problemas de tensão e carregamento na configuração normal do alimentador durante o período de carga pesada, realizou-se a simulação de transferência das sedes municipais. No caso da sede municipal “A” foi simulada a abertura do religador 2 e o fechamento do religador 5, e para a transferência da sede municipal “B” foi simulada a abertura do religador 4 e o fechamento do religador 6. Conforme Figura abaixo a transferência da sede municipal “A” causa queda de tensão em

grande parte do alimentador L12. A transferência da sede municipal “B” não causa problemas de tensão.

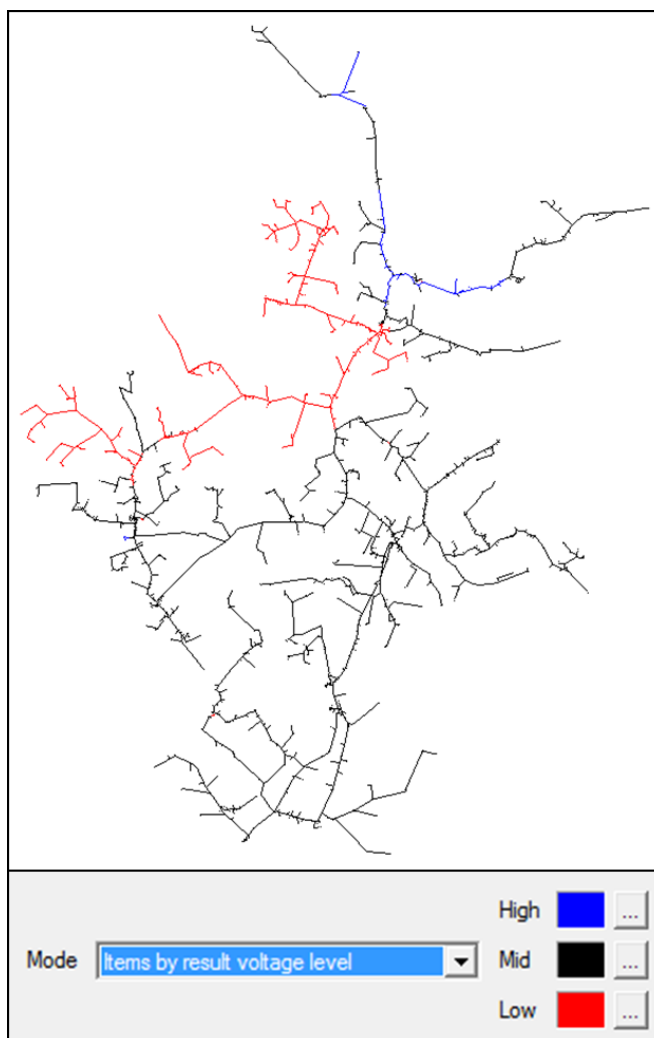


Figura 5-16 – Alimentadores com o fluxo de potência com a transferência das sedes municipais no período de carga pesada. A transferência da sede municipal “A” causa queda de tensão em grande parte do alimentador L12. A transferência da sede municipal “B” não causa.

A Figura 5-17 mostra todos os alimentadores na cor preta após a simulação de transferência das sedes municipais. Isso indica que não foi identificada sobrecarga durante esta simulação.

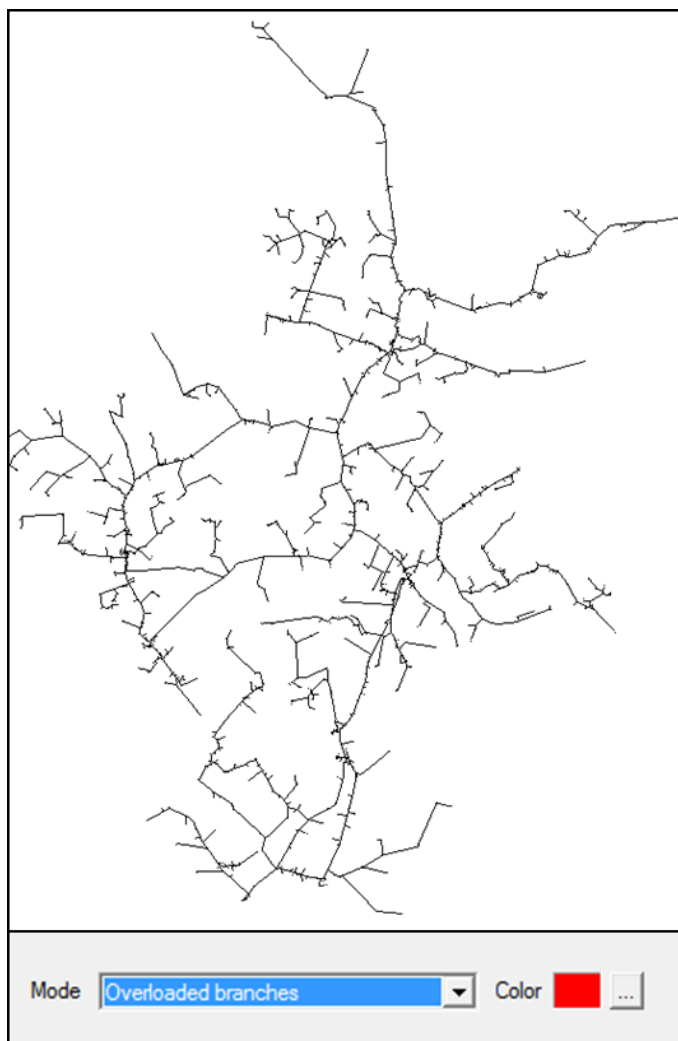


Figura 5-17 – Alimentadores com o fluxo de potência com a transferência das sedes municipais no período de carga pesada. Não foi identificada sobrecarga nos componentes deste sistema elétrico durante esta simulação.

Conforme os resultados de simulações apresentados nas Figuras 5-14 a 5-17, no horário de ponta é possível realizar a transferência apenas da sede municipal “B”. Pois, caso a sede municipal “A” seja transferida neste período haverá transgressão dos níveis de tensão. Como é possível transferir a sede municipal “B” sem transgredir limites de níveis de tensão e carregamento dos alimentadores no horário de maior carga, não haverá problemas nos horários de carga média e leve para esta sede municipal.

Para o caso da sede municipal “A” foi realizada a simulação de transferência no período de carga leve a fim de avaliar a viabilidade desta transferência. A Figura 5-18 apresenta o resultado da simulação desta transferência. É possível observar que mesmo durante a carga

leve a transferência da sede municipal “A” é inviável, pois causaria transgressão dos níveis de tensão considerados adequados.

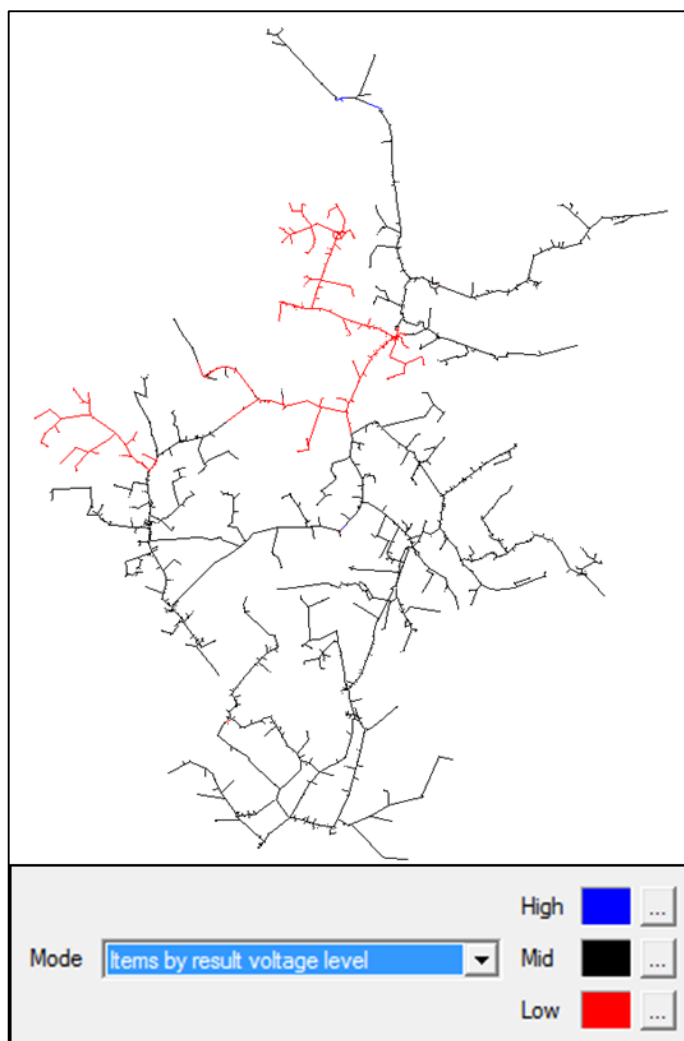


Figura 5-18 – Alimentadores com o fluxo de potência com a transferência da sede municipal “A” no período de carga leve. Mesmo durante a carga leve a transferência da sede municipal “A” causaria transgressão dos níveis de tensão considerados adequados.

Considerando que apenas a transferência da sede municipal “B” é viável pela análise dos níveis de tensão e carregamento, o próximo passo foi verificar os níveis de curto circuito e avaliação da coordenação da proteção. O cálculo das correntes de curto-circuito foi realizado atendendo as observações de (CPFL, 2006): “Os valores das correntes para os curtos-circuitos trifásicos e bifásicos serão calculados como valores máximos, ou seja, a impedância de contato será zero.” “As correntes de curto-circuito fase-terra deverão ser calculadas com impedância de contato igual à zero (curto-circuito fase-terra máximo), que será usada para dimensionamento de equipamentos, e com impedância de contato igual à 40 ohms (curto-

circuito fase-terra mínimo), que será usado para as verificações de coordenação e seletividade entre os dispositivos.” A Figura 5-19 mostra os ajustes realizados no software para a realização deste cálculo.

Impedance for phase-to-ground faults (Ohms)

Rf 40 Xf 0

Fault All Types

- 3-phase-to-ground
- Phase-to-ground
- Phase-to-ground through impedance
- Phase-to-phase

Figura 5-19 – Ajustes no software para cálculo de curto-circuito.

O resultado do cálculo de curto-circuito é apresentado na tabela 5-3:

Tabela 5-3 – Valores das correntes de curtos-circuitos calculadas.

Curto-circuito	Trecho Transferido		Retaguarda do trecho transferido.
	Maior Religador 6	Menor Religador 4	Curto no Religador que protege o religador 06
Trifásico	319,38	303,30	3275,04
Bifásico	275,95	262,46	2841,67
Fase terra	231,06	218,51	2829,27
Fase terra com impedância	119,28	115,45	203,05

Para tornar mais claro o entendimento dos valores da tabela 5-3, a Figura 5-20 apresenta um diagrama simplificado do sistema elétrico em estudo com os respectivos valores de curto-circuito.

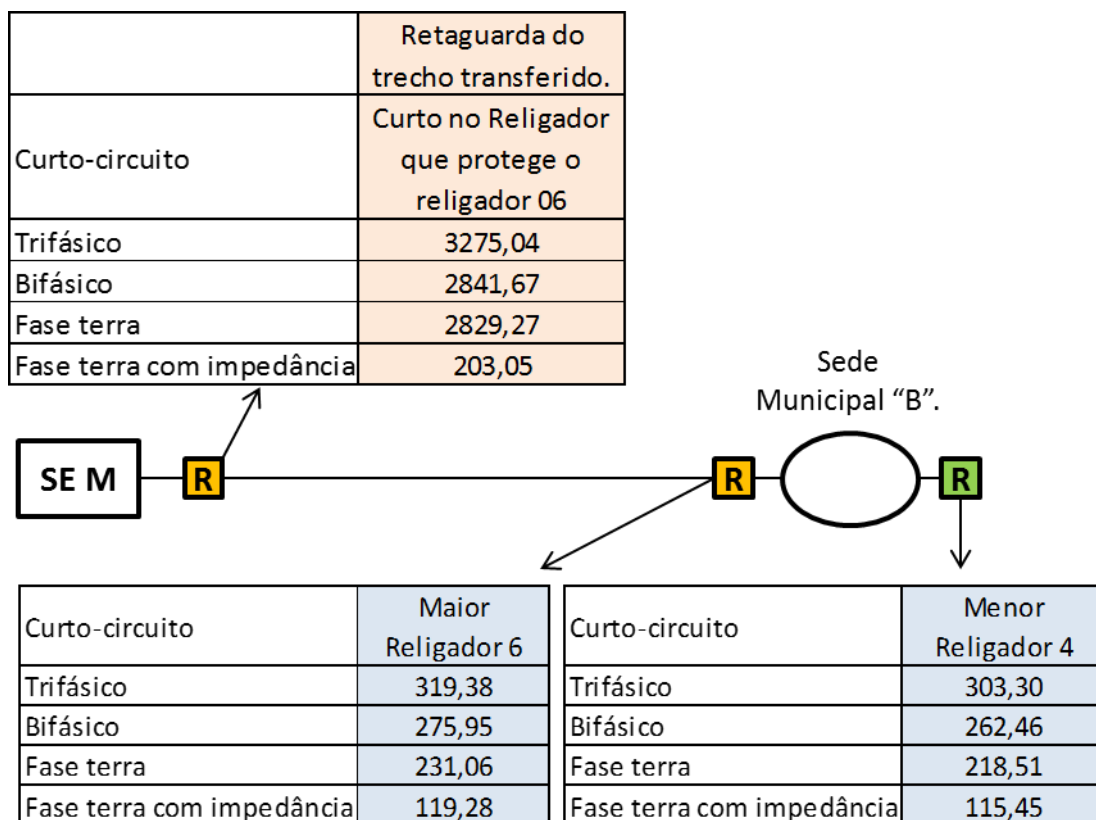


Figura 5-20 – Resultados do cálculo de curto-circuito.

Os ajustes atuais do religador que protege o religador 6 a ser instalado é:

- Sensor de fase: 220A 3(IEC VI dial 0,10)
- Sensor de terra: 50A 3(9”) (Tempo definido)

O ajuste proposto para o religador 6 é o seguinte:

- Sensor de fase: 70A 3(IEC VI dial 0,10)
- Sensor de terra: 21A 3(8”) (Tempo definido)

Conforme (Santos, 2012) sobre coordenação de religadores, “A coordenação entre curvas lentas é obtida quando a diferença entre os tempos de operação das curvas temporizadas dos equipamentos é superior a 0,2 segundos.” Nos religadores em análise, há apenas curvas lentas. O coordenograma da Figura 5-21 demonstra que os ajustes propostos são adequados para garantir a coordenação entre os religadores analisados. As linhas vermelhas do coordenograma são do religador já instalado a montante do ponto indicado para o religador 6. As linhas pretas contínuas representam os ajustes propostos para o religador 6. As linhas pretas pontilhadas representam os ajustes propostos para o religador 6 acrescidos de 0,2 segundos.

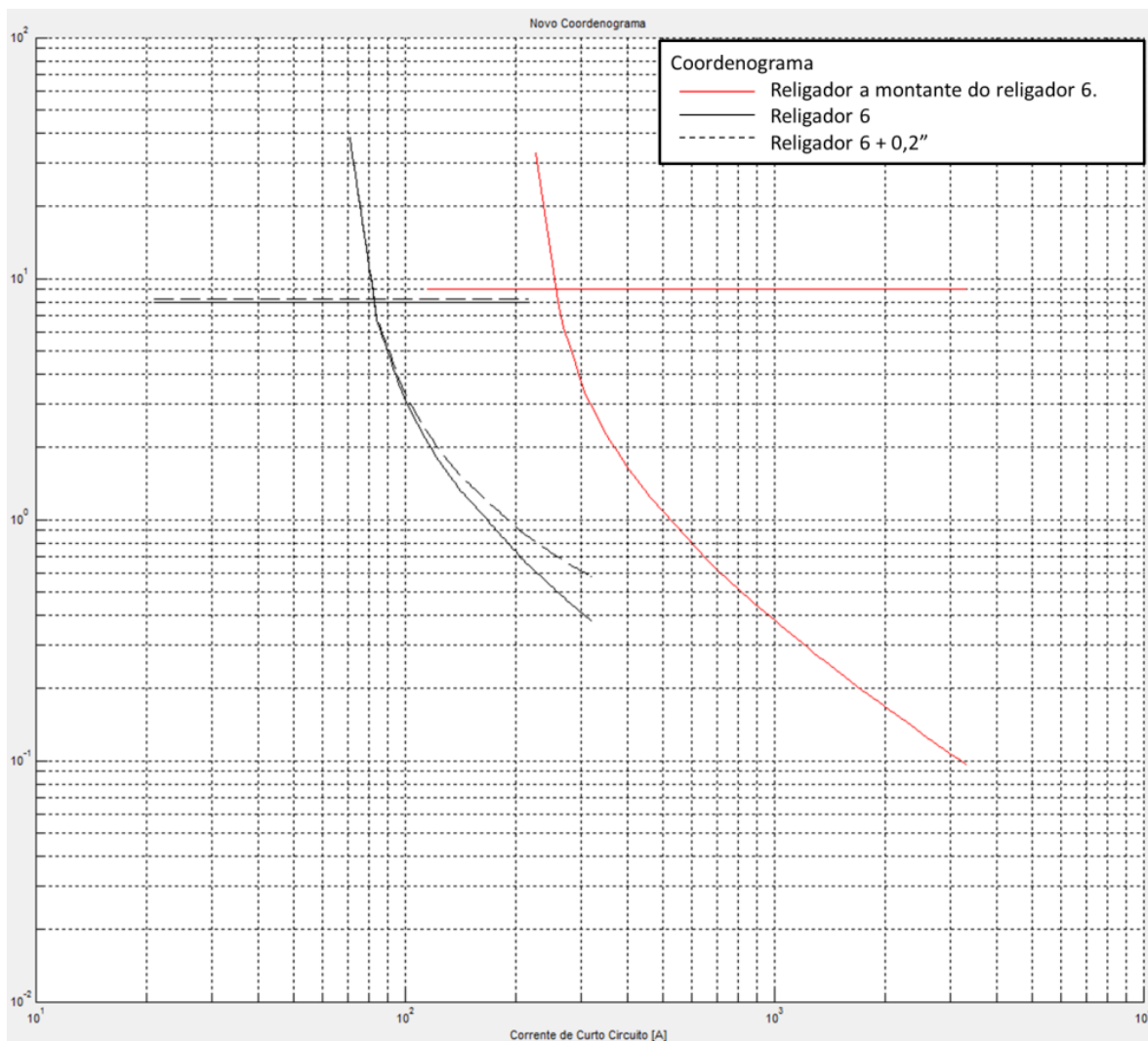


Figura 5-21 – Coordenograma entre os ajustes do religador existente a montante do ponto indicado para instalação do religador 6 e os ajustes propostos para o religador 6.

Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o trabalho desenvolvido. Foi realizada a comparação das melhorias potenciais na continuidade do fornecimento de energia elétrica provocados pela instalação de religadores normalmente abertos (NA). Definiu-se entre os equipamentos indicados para instalação o que traria maior benefício para a continuidade do fornecimento de energia elétrica no sistema elétrico em estudo.

Após o processo de escolha dos pontos candidatos com maior potencial de melhoria na continuidade do fornecimento de energia, realizou-se a verificação da viabilidade desta transferência de carga por meio de um programa de fluxo de potência. Neste programa foi avaliado o carregamento dos componentes da rede, os níveis de tensão, e as correntes de curto-circuitos.

A simulação no programa de fluxo de potência indicou que apenas um dos pontos indicados para instalação do religador seria viável tecnicamente, atendendo níveis de tensão, limites de carregamento e proteção deste sistema elétrico.

A seguir executou-se o estudo de coordenação entre os equipamentos de proteção existentes no sistema elétrico em estudo e o religador a ser instalado. Os critérios utilizados para esta coordenação foram apresentados. O coordenograma dos equipamentos de proteção foi construído com estes critérios.

O próximo capítulo tratará das conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conclusões

Neste trabalho foi apresentado de forma simplificada as características e principais aplicações do equipamento de proteção de nome religador. Trata-se de um equipamento de proteção utilizado em sistemas elétricos de distribuição de energia. Ele é extremamente importante para o desempenho destes sistemas elétricos e também para a segurança dos operadores e da população.

O religador monitora o sistema elétrico e o interrompe em casos de falha entre fases ou entre fases e terra. Ele religa o sistema elétrico após um tempo parametrizável a fim de verificar se a falha foi permanente ou transitória. No caso de falhas transitórias, o fornecimento de energia é restabelecido automaticamente. No caso de falhas permanentes, o sistema elétrico permanece desligado até a intervenção da equipe de manutenção da distribuidora de energia.

Abordou-se os indicadores de qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica, conforme o PRODIST. Foram abordados os indicadores individuais: DIC e FIC. E também os indicadores coletivos: DEC e FEC. Foi apresentado um exemplo de cálculo para os indicadores coletivos, que possuem relação direta com a metodologia apresentada neste trabalho.

A técnica para estudos de confiabilidade em sistemas de distribuição de energia elétrica foi abordada em seguida. Foram informados os modelos de sistemas de confiabilidade série e paralelo, em seguida definiu-se que o sistema em série seria o mais adequado ao sistema em estudo. Foram utilizados quatro alimentadores reais do sistema de distribuição. Cada km de rede foi considerada um componente do sistema. Assim, a taxa de falha do trecho de interesse foi dada pelo produto da taxa de falha por km pela quantidade de km de cada alimentador estudado.

No quinto Capítulo foi realizada uma proposta de alocação de religadores normalmente abertos. Realizou-se a comparação dos benefícios da instalação de religadores

normalmente abertos (NA). Para isso utilizou-se uma equação que relaciona a confiabilidade dos sistemas envolvidos a equação de DEC. Assim definiu-se entre os equipamentos indicados para instalação o que teria maior potencial de melhoria nos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Após o processo de escolha dos pontos candidatos com maior potencial de melhoria na continuidade do fornecimento de energia, realizou-se a verificação da viabilidade desta transferência de carga por meio de um programa de fluxo de potência. Neste programa foi avaliado o carregamento dos componentes da rede, os níveis de tensão, e as correntes de curto-circuitos.

A simulação no programa de fluxo de potência indicou que apenas um dos pontos indicados para instalação do religador seria viável tecnicamente, atendendo níveis de tensão, carregamento do sistema elétrico e proteção deste sistema.

A seguir executou-se o estudo de coordenação entre os equipamentos de proteção existentes no sistema elétrico em estudo e o religador a ser instalado. Apresentou-se os critérios utilizados para esta coordenação e o coordenograma construído com estes critérios.

Observa-se que há uma complexidade inerente à medida que se aumenta o número de pontos candidatos à instalação de religadores normalmente abertos. Com a metodologia proposta é possível comparar n casos e definir qual deles terá maior potencial de melhoria na continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Com o advento de sistema de restabelecimento automático self-healing, a utilização de uma técnica para alocação de religadores NA torna-se tão essencial quanto a alocação de religadores NF, pois esta ação potencializará o benefício da instalação deste tipo de equipamento em redes de distribuição.

Com o processo de renovação das concessões de distribuição de energia elétrica, os indicadores de continuidade DEC e FEC tornaram-se ainda mais importantes. A metodologia de alocação proposta apresenta relação direta com a melhoria destes indicadores, sendo contribuição importante para a renovação das concessões.

Sugestões para Trabalhos Futuros

O objetivo principal desta dissertação é auxiliar na melhoria do desempenho de redes de distribuição de energia elétrica com foco na continuidade do fornecimento. Assim, nesta mesma linha, seria importante estudos de melhorias nos seguintes tópicos:

- Automação: formas de melhorar a comunicação com religadores a fim de possibilitar restabelecimentos de energia mais eficazes.

- Restabelecimento automático da alimentação de blocos de carga utilizando redes inteligentes.
- Estudos de localização e isolamento de falhas em redes de distribuição;
- Vida útil de equipamentos de redes de distribuição. Visão técnica e financeira considerando o Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico (Aneel, 2015).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AES Eletropaulo. ND 3.001 - Proteção de Redes de Distribuição Aérea Primária – Agosto de 2004.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. (2012). “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST”, Módulo 1: Introdução [Online]. Disponível: <http://www.aneel.gov.br/prodist>. Acesso em 15/02/2017.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. (2012). “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST”, Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica [Online]. Disponível: <http://www.aneel.gov.br/prodist>. Acesso em 15/02/2017.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. (2015). “Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico - MCPSE”. Disponível: <http://www.aneel.gov.br/documents/656815/14887121/MANUAL+DE+CONTROLE+PATRIMONIAL+DO+SETOR+EL%3%89TRICO+-+MCPSE/3308b7e2-649e-4cf3-8fff-3e78ddeb98b>. Acesso em 20/06/2017.

BANDEIRANTE. Proteção de Redes de Distribuição Aérea Primária. Norma Técnica/Bandeirante, 1987.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. ND 3.1 - Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas – Janeiro de 2014.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. NTC 858136 - Regulador de Tensão – 13,8kV – 150/200A Instalação em plataforma. Novembro de 2010.

CPFL Energia – Proteção de Redes Aéreas de Distribuição – Sobrecorrente – Setembro de 2006.

FELBER, L. A. Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. UNIFEI, 2010.

FELBER, L.A. et. Al, “Low Cost Self-Healing Applied to Distribution Grid Supplying Brazilian Municipalities”. ISGT – LA – 2015, Montevideo – Uruguai.

KONDO, Daniela Vinci. “Alocação de Religadores Automatizados em Sistemas De Distribuição”, Dissertação de Mestrado, 2015, USP, São Paulo – SP.

Nascimento J. A. O. “Análise da Regulação de Tensão em um Alimentador Utilizando Software de Fluxo de Potência”, Monografia de Especialização, 2014, UNIFEI, Itajubá – MG.

SACRAMENTO, C. E. “Avaliação da Confiabilidade no Planejamento de Sistemas de Distribuição”, Dissertação de Mestrado, 2002, UNIFEI, Itajubá – MG.

SANTOS, R. S. “Proteção Contra Sobrecorrentes em Redes de Distribuição Aéreas de 13,8 kV: Análise do Desempenho do Sistema Atual e Propostas para Melhoria”, Monografia de Especialização, 2012, UFMG, Belo Horizonte – MG.

SILVA, Luiz Gustavo W. da. PEREIRA, Rodrigo A. F. MANTOVANI, José R. Sanches. Alocação Otimizada de Dispositivos de Controle e Proteção em Redes de Distribuição. Revista Controle & Automação/Vol. 21 Nº 3. Maio e Junho de 2010.

TOSHIBA. Manual de Instruções para Reguladores de Tensão Monofásicos. Junho de 2012.

ANEXOS

I. Submissão de Artigo na Revista IEEE R9

Em 2016 foi submetido um artigo à revista IEEE região 9, objeto de pesquisa desta dissertação. A revista IEEE região 9 abrange toda a América Latina e o Caribe, com exceção da Jamaica. A imagem abaixo mostra as 10 grandes subdivisões geográficas do IEEE.



Figura I-1 - Representação gráfica das 10 subdivisões geográficas do IEEE. (Fonte: <http://sites.ieee.org/r9/region-9/> consultado em 10/05/2017.

Este artigo, com o título: “*Allocation of Reclosers Normally Open in Distribution Networks with Goal of Improvement in the Continuity Indicators in Electricity Supply*”, foi escrito pelos seguintes pesquisadores: Jailson Augusto Oliveira do Nascimento, Luis Antonio Felber, Mozart Ferreira Braga Jr e Benedito Isaias de Lima Lopes.

Em 29/12/2016 o Editor Chefe do IEEE R9 enviou um e-mail com as seguintes considerações sobre o artigo apresentado:

“*O artigo apresenta uma metodologia que deveria levar em consideração a análise antecipada da viabilidade da transferência de carga por meio de um programa de fluxo de potência, avaliando o carregamento dos componentes da rede, os níveis de tensão, e as correntes de curto-circuitos, como mencionado inclusive pelos próprios autores.*”

Desse modo, este revisor considera que há a necessidade de se acrescentar esses aspectos no artigo, para que este possa atingir a qualidade necessária para publicação neste periódico.

Acrescente-se a isso também as seguintes recomendações:

- 1 - Utilizar "recloser" ao invés de "re-closer";*
- 2 - Utilizar "indicators" ao invés de "indexes";*
- 3 - Revisar as palavras chaves por outras mais adequadas ao conteúdo do artigo, por exemplo, adicionar "reclosers normally open", e retirar "Optimizaton";*
- 4 - Palavras na língua inglesa devem ficar em itálico. Verificar todo o texto;*
- 5 - No primeiro parágrafo da Seção IV, na página 3, é dito que uma das formas para avaliação da confiabilidade em sistemas de distribuição é o sistema série. Quais seriam as outras e por que os autores optaram por essa? Quais as vantagens sobre as outras formas?*
- 6 - No segundo parágrafo da Seção IV, na página 3, saiu impresso "I_" ao invés de λ ;*
- 7 - Na Tabela 1 faltou especificar Cc e indicar Ca como o n° de unidades consumidoras atingidas.”*

Os autores realizaram a revisão do artigo considerando todas as sugestões do editor chefe do IEEE R9. Após esta revisão o artigo ficou composto por seis capítulos. O Capítulo I tratou da introdução do artigo. Nele foi explicado que as concessionárias de distribuição de energia elétrica precisam apresentar resultados de continuidade do fornecimento de energia elétrica cada vez melhores. E que a utilização de religadores tem impacto direto na melhoria destes resultados. O Capítulo II apresentou o equipamento de proteção do sistema elétrico de nome religador e apresentou exemplos para sua utilização. O Capítulo III abordou o tema dos indicadores de qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica conforme PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). O Capítulo IV apresentou o tema de confiabilidade em sistemas de distribuição de energia elétrica, explicando a modelagem adequada de um sistema de distribuição de energia elétrica para se realizar um estudo de confiabilidade. No Capítulo V foi realizada a comparação dos benefícios da instalação de religadores normalmente abertos (NA) utilizando uma equação que relaciona a confiabilidade dos sistemas envolvidos com o tempo equivalente de uma equação de interrupção para a unidade de consumo. Dessa forma, verificou-se a melhor escolha entre a melhoria da continuidade no fornecimento de energia elétrica. O lugar escolhido foi aquele com o maior potencial de melhoria de desempenho para todo o sistema.

Após o processo de escolha dos pontos candidatos com maior potencial de melhoria na continuidade do fornecimento de energia, foi verificada a viabilidade desta transferência de carga por meio de um programa de fluxo de potência, onde se avaliou o carregamento dos componentes da rede, os níveis de tensão, e as correntes de curto-circuitos. A análise do carregamento dos componentes da rede garante a integridade do sistema. Os níveis de tensão foram avaliados a fim de garantir a qualidade do produto. E as correntes de curto-circuito foram avaliadas para o estudo da proteção do sistema em sua nova configuração após transferência de carga. O Capítulo VI concluiu o artigo. Nele concluiu-se que após o processo de escolha dos pontos candidatos com maior potencial de melhoria na continuidade do fornecimento de energia, é essencial verificar se a instalação de um religador naquele ponto é tecnicamente viável. No caso estudado foi possível verificar que seria tecnicamente viável a instalação do religador 6. Apesar do religador 5 ser potencialmente mais vantajoso sob o ponto de vista de melhoria de desempenho, ele não é tecnicamente viável de ser instalado. Observou-se ainda que há uma complexidade inerente à medida que se aumenta o número de pontos candidatos à instalação de religadores normalmente abertos. Com a metodologia proposta é possível comparar n casos e definir qual deles terá maior potencial de melhoria na continuidade do fornecimento de energia.

O artigo revisado foi submetido no mês de março de 2017 e está aguardando a revisão.

II. ESTUDO DO ALIMENTADOR

Condutores

Os condutores utilizados nestes alimentadores de média tensão com seus respectivos parâmetros podem ser observados na tabela abaixo. O extrator do GIS (geographic information system) para o programa de fluxo considera a mesma impedância independente do arranjo. Ou seja, tanto para redes monofásicas quanto para redes trifásicas a impedância do quilômetro de rede é considerada a mesma.

Tabela II-1 – Característica de condutores.

Descrição Resumida do Cabo	Código	Resistência - Sequência Positiva (ohms/Km)	Reatância - Sequência Positiva (ohms/Km)	Resistência - Sequência Zero (ohms/Km)	Reatância - Sequência Zero (ohms/Km)	Corrente Admissível (A)
1/0 AWG - 53,43 mm ² - Alumínio-CA - Primário	1/0CA	0,6375	0,4282	1,9125	1,2846	201
1/0 AWG - 53,43 mm ² - Cobre nu - Primário	1/0CU	0,4047	0,4287	1,2141	1,2861	252
2 AWG - 33,63 mm ² - Alumínio-CA - Primário	2CA	1,0145	0,4462	3,0435	1,3386	149
2 AWG - 33,63 mm ² - Alumínio-CAA - Primário	2CAA	1,0323	0,5026	3,0969	1,5078	151
336,4 MCM - 170,5mm ² - Alumínio-CA - Primário	336CA	0,2006	0,3809	0,6018	1,1427	425
336,4 MCM - 170,5mm ² - Alumínio-CAA - Primário	336CAA	0,2035	0,3696	0,6105	1,1088	432
4 AWG - 21,15 mm ² - Alumínio-CA - Primário	4CA	1,6118	0,5207	4,8354	5,4084	111
4 AWG - 21,15 mm ² - Alumínio-CAA - Primário	4CAA	1,6397	0,4992	4,9191	1,4976	112
2 AWG - 33,63 mm ² - Cobre Isol.15kV - Primário	ISL2CU	0,6694	0,1480	2,0082	0,4440	116
4 AWG - 21,15 mm ² - Cobre Isol.15kV - Primário	ISL4CU	0,9282	0,1562	2,7846	0,4686	136
50 mm ² - 15 kV(Isol) - Multiplex-Al-15 - Primário	ISL50	0,8220	0,1460	2,4660	0,4380	175
1/0 AWG - 53,43 mm ² - Protegida -15kV - Primário	RDP1/0	0,6387	0,4505	1,9161	1,3515	210
150 mm ² - 15kV - Protegida -15kV - Primário	RDP150	0,2469	0,2610	0,7407	0,7830	456
50 mm ² - 15kV - Protegida -15kV - Primário	RDP50	0,7394	0,3048	2,2182	0,9144	225

Tipos de Redes Primárias

Conforme a (CEMIG, 2014), os tipos de redes primárias utilizados na CEMIG são:

- Redes de Distribuição Compacta: Esta modalidade de rede utiliza um cabo mensageiro de aço 9,5mm para sustentação do(s) cabo(s) fase(s) coberto(s) por meio de espaçadores poliméricos, instalados em intervalos regulares determinados nas normas de instalação básica. Os padrões de instalação básica referente a esse tipo de rede estão estabelecidos nas ND - 2.9 e ND - 2.10.
- Redes de Distribuição Isoladas de Média Tensão: Esta modalidade de rede utiliza três condutores isolados, blindados, e espinados em torno de um cabo mensageiro de aço 9,5mm de sustentação. Os padrões de instalação básica referente a esse tipo de rede estão estabelecidos na ND – 2.7.
- Redes de Distribuição Aéreas Convencionais: Caracterizam-se por utilizar cabos de alumínio nus sobre cruzetas de madeira, fibra, plástico e metálicos e isoladores de porcelana ou vidro. Os padrões de instalações básicas desse tipo de rede estão estabelecidos nas ND - 2.1 e ND - 2.4. Esta modalidade de rede não deve ser construída em área urbana, permitindo o uso de cabos nus apenas para reparo.

Equipamentos de Proteção

Os equipamentos de proteção utilizados neste sistema de distribuição de média tensão são Chave Fusível e Religador.

Segundo (CPFL, 2006), a chave fusível é o dispositivo mais empregado em saídas de ramais, devido ao seu baixo custo. São padronizadas para 100A de capacidade nominal e os cartuchos devem ter capacidade de interrupção superior à máxima corrente de curto-circuito disponível no ponto de instalação. As curvas tempo X corrente de interrupção estão definidas na NBR-5359. Na Figura II-1 é apresentada uma imagem de uma chave fusível.



Figura II-1 – Chave Fusível. (Fonte: Internet).

Conforme (CPFL, 2006), os religadores são usados tanto para a proteção da saída de alimentadores, como para a proteção de linhas, ao longo do alimentador. Possuem unidades para proteção de fase e terra independentes. Pode ser ajustado para utilizar dois tipos de curvas: uma rápida e uma temporizada. A característica de operação do religador permite que ambas as curvas sejam usadas em uma sequência de aberturas e religamentos de maneira que o religador opere na curva rápida durante as primeiras operações e na curva lenta nas últimas operações antes do bloqueio. Utilizando esta característica de forma adequada consegue-se evitar que faltas de natureza transitória queimem elos fusíveis. Os religadores devem ser dimensionados para suportarem a corrente nominal e para interromperem a corrente de curto-circuito máxima do seu ponto de instalação.

Neste alimentador há religadores com comandos hidráulicos e com comandos microprocessados.

Nos religadores controlados hidráulicamente, as sobrecorrentes são detectadas pelas bobinas de disparo, também chamadas de bobina série, que estão ligadas em série com a linha. Quando flui uma corrente de valor superior a corrente mínima de disparo do religador, através da bobina série, o núcleo é atraído para o interior da bobina e esse movimento provoca a abertura dos contatos principais do religador.

A temporização e a sequência de operações são realizadas pelo bombeamento de óleo através de câmaras hidráulicas separadas e dotadas de sistemas de válvulas e pistões.

O mecanismo de fechamento destes religadores podem ser de duas maneiras. Alguns empregam molas de fechamento, que são carregadas pelo movimento do núcleo da bobina série. Noutros é instalada uma bobina de fechamento que é energizada pela tensão de linha.

Neste último o religador deve ser orientado de forma que as buchas onde estão as bobinas de fechamento fiquem voltadas para a fonte.

Este tipo de religador, normalmente, possui três alavancas externas. Uma é a alavanca de operação manual. Ela possibilita a abertura ou fechamento manualmente com os religadores energizados. Nos religadores cujo fechamento é feito mecanicamente, esta alavanca atua diretamente sobre esse mecanismo e nos religadores equipados com bobina de fechamento, esta alavanca atua fechando o contator dessa bobina, que energizado, procederá o fechamento do religador. A outra alavanca é a alavanca de bloqueio do religamento automático. Ela impede o religamento fazendo com que o religador permaneça aberto após o primeiro disparo. A alavanca para bloqueio de religamento automático deve ser utilizada sempre que se recorrer ao religador para localização de defeitos, ou quando estiver sendo executado serviço com linha energizada no lado de carga do religador. A terceira bloqueia a proteção para faltas de fase à terra. São utilizadas principalmente durante transferências de carga para evitar o bloqueio do religador devido a desequilíbrio de corrente entre as fases.

Os religadores são equipados com contadores de operações. São contadores mecânicos. Alguns religadores possuem um contador por fase, pelo fato de operarem somente nas fases defeituosas. Outros possuem apenas um contador pelo fato de operarem tripolarmente. A Figura II-2 apresenta a imagem de um religador com comando hidráulico.

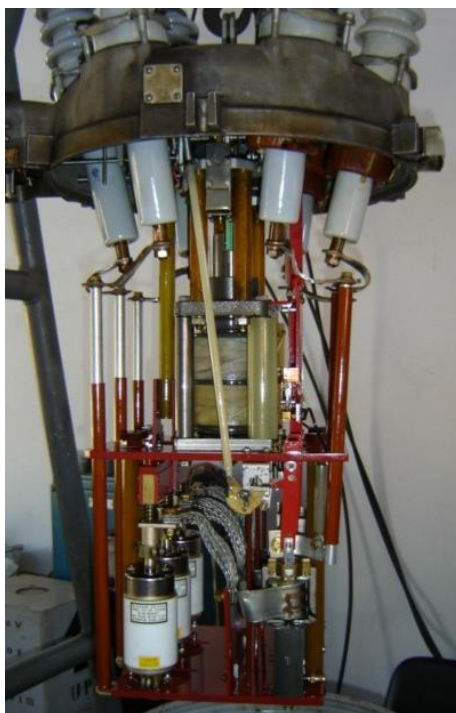


Figura II-2 – Religador tipo KF com comando hidráulico. (Fonte: Fotografia tirada em uma oficina de manutenção de uma distribuidora de energia).

Nos religadores com controle microprocessado as correntes são medidas nas três fases através de sensores de corrente (rogowsky) ou transformadores de corrente (TC). A maior parte deles oferece também medição de tensão, alguns via transformadores de tensão (TP) e outros pela alimentação em baixa tensão da cabine de controle onde fica alojado o relé de controle microprocessado. Com este controle microprocessado tem-se uma extensa lista de funcionalidades de proteção, automação e registro de dados.

Toda a parametrização deste tipo de religador pode ser feita por meio de um computador conectado ao seu controle microprocessado. Cada fabricante oferece um software de parametrização. A conexão normalmente é feita via porta serial. Alguns religadores poderão oferecer alguma opção a mais ou a menos dependendo do modelo escolhido.

Há vários grupos independentes de ajustes de proteção, podendo ser configurados para permitir coordenação de sistemas com diferentes características.

Proteção contra sobre correntes de fase: O usuário escolhe o valor de pick-up e a curva a ser utilizada para esta operação. Pode ser escolhida uma curva padrão (ANSI, IEC) (1) ou customizada uma curva. Alguns religadores oferecem proteção direta e reversa, inclusive com ajustes distintos.

Proteção contra sobrecorrentes de falta à terra: O usuário escolhe o valor de pick-up e a curva a ser utilizada para esta operação. Pode ser escolhida uma curva padrão (ANSI, IEC) ou customizada uma curva. Alguns religadores oferecem proteção direta e reversa, inclusive com ajustes distintos.

Coordenação de sequência de zona: Permite que dispositivos em série se mantenham corretamente coordenados em cada disparo da sequência de operação.

Proteção de carga fria (Cold Load Pickup): Serve para incrementar os ajustes temporariamente para o religador não atuar com entrada de cargas após um bloqueio. Opera automaticamente com multiplicador de corrente e tempos de operação configuráveis pelo usuário sempre que uma operação de religamento ocorre.

Proteção de corrente de inrush: Tem o objetivo de evitar a operação do religador para correntes de magnetização. Opera automaticamente com multiplicador de corrente e tempos de operação configuráveis pelo usuário sempre que uma operação de religamento ocorre.

Além destas opções, normalmente os religadores com comando microprocessado oferecem as seguintes funções auxiliares:

- a) Registro de eventos: Fornece ao operador um relatório de campo, indicando a causa da operação do religador, a fase em falta e o nível da corrente.

- b) Relatório de eventos detalhados: Pode ser coletado no relé, via computador com o software específico instalado, um relatório das últimas ocorrências do religador. Este relatório é útil na análise de falhas mais complexas.
- c) Medição de corrente: Estes equipamentos armazenam os dados referentes à corrente de carga por fase. Os intervalos entre as medições podem ser conFigurados pelo usuário. As Figuras II-3 e II-4 apresentam imagens de religadores com comandos microprocessados.



Figura II-3 – Religador tipo OSM com controle microprocessado. Fabricante: Noja Power. Fonte: Noja Power (2008).



Figura II-4 – Religador tipo OVR com controle microprocessado. Fabricante: ABB. Fonte: ABB (2010).

Como exemplo, utiliza-se para a parametrização do relé PCD2000 do religador tipo OVR o software AFSuite. Este software é disponibilizado pela ABB no endereço:

<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=AFSUIE&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>”.

A Figura II-5 apresenta a imagem da primeira tela do software AFSuite.

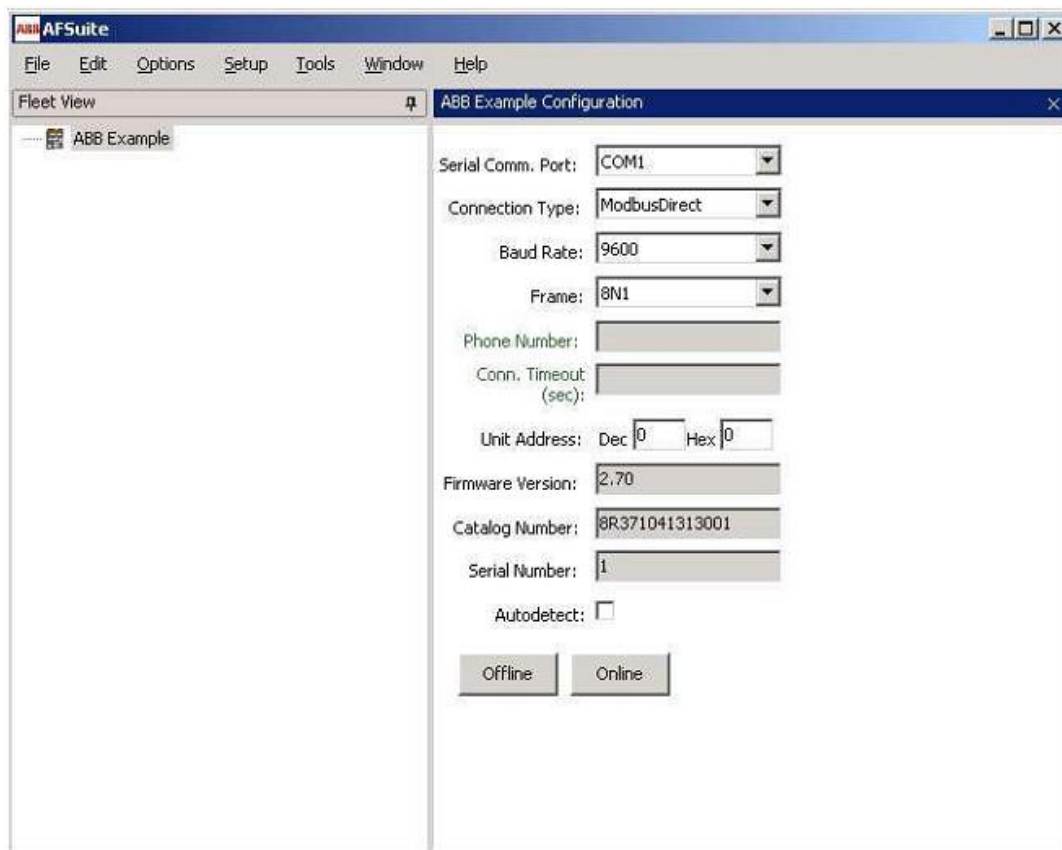


Figura II-5 – Visão da tela inicial do software AFSuite. Fonte: Software baixado do site da ABB.

Equipamentos de Regulação

Conforme os dados gerais do alimentador, apresentados anteriormente, os equipamentos de regulação utilizados neste sistema de distribuição de média tensão são Regulador de Tensão e Capacitor.

Conforme (Felber, 2010) a aplicação de reguladores de tensão nos sistemas de distribuição de energia elétrica teve início na década de 40, nos países desenvolvidos, principalmente nos EUA, em função de sua grande extensão territorial, onde os centros de consumo estão espalhados por vastas áreas, distantes dos pontos de geração, e, aliado a isso, o aparecimento de grande quantidade de novos aparelhos eletroeletrônicos, sensíveis a oscilações de tensão, fez aumentarem as reclamações dos consumidores, que passaram a

exigir boa qualidade na distribuição de energia elétrica. Por conta disso, hoje se encontram instalados em vários pontos daquele país dezenas de milhares de reguladores, fornecendo aos pontos de consumo uma regulação de tensão adequada e conferindo qualidade ao fornecimento de energia. Isso traz pelo menos três consequências benéficas: Satisfação do consumidor; Redução das perdas na distribuição; Aumento do faturamento das concessionárias de energia elétrica. O Brasil apresenta certa similaridade com os EUA, no que se refere ao espaço territorial, o que viabiliza a utilização dos reguladores de tensão. Estes têm grande aceitação por parte das concessionárias, por razões econômicas, de simplicidade e versatilidade.

Segundo (Felber, 2015), o regulador de tensão é um equipamento que mantém um nível de tensão pré-determinado em uma linha de distribuição, apesar das variações de carga, sendo basicamente um autotransformador com comutação automática de tap, através de um comutador sob carga. Essa variação normalmente é dividida em até 32 tapes (16 tapes para abaixar e 16 tapes para elevar a tensão), conseguindo com isto uma variação de $\pm 0,65\%$ em cada tap, totalizando uma variação na tensão em $\pm 10\%$ da tensão de alimentação.

O regulador de tensão tem a função de manter um nível de tensão pré-determinado em uma linha onde a regulação estiver deficiente. O objetivo dos tapes é atenuar o efeito da regulação, pois uma variação de 10% seria muito elevada.

Há um relé para acompanhar a tensão do sistema e indicar o melhor momento para modificar o tap. Uma amostra da tensão na entrada do regulador é colhida por meio de um TP e comparada com a tensão de ajuste. Quando há divergência, é enviado um sinal para comutar os taps, aumentando ou diminuindo a quantidade de enrolamentos que atendem a carga. Existe ainda uma chave reversora de polaridade, o que permite posicionar os enrolamentos utilizados para regulação em posição aditiva ou subtrativa, permitindo assim a variação de $\pm 10\%$.

O regulador de tensão é um equipamento monofásico. Na maioria dos casos a regulação é feita por fase, e os reguladores são ligados em estrela, o que permite corrigir possíveis distorções dos níveis de tensão do sistema elétrico de distribuição. Em alguns casos específicos, como por exemplo: uma alimentação a três fios sem condutor neutro, os reguladores de tensão podem ser ligados em triângulo. A Figura II-6 apresenta um esquema simplificado para regulação de tensão.

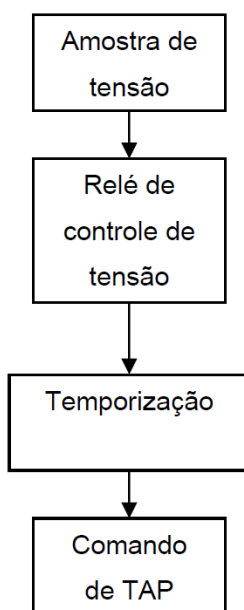


Figura II-6 – Esquema simplificado para regulação de tensão (Fonte: (Felber, 2015)).

A Figura II-7 apresenta detalhes do regulador de tensão.

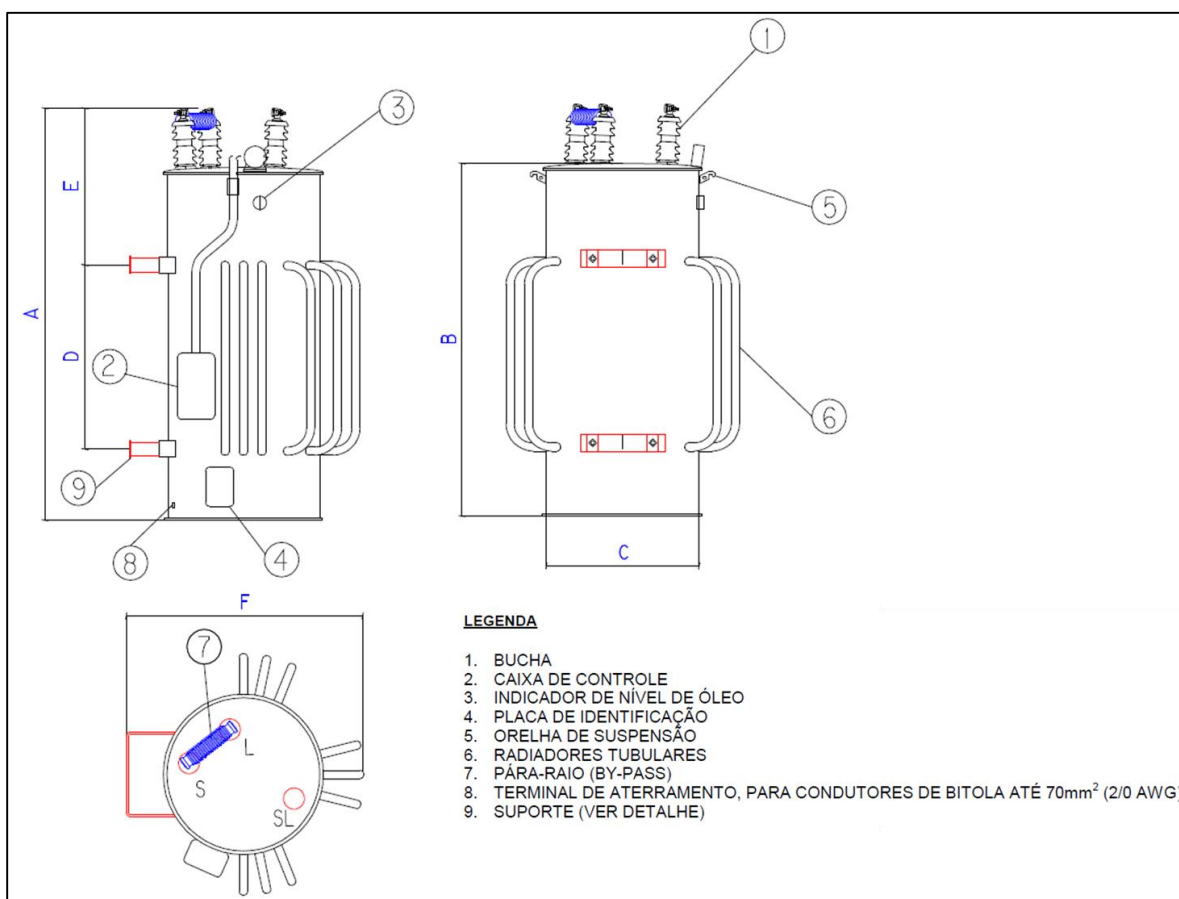


Figura II-7 – Detalhes do regulador de tensão (Fonte: (Copel, 2010)).

As Figuras II-8 e II-9 apresentam diagramas de ligação reguladores de tensão.

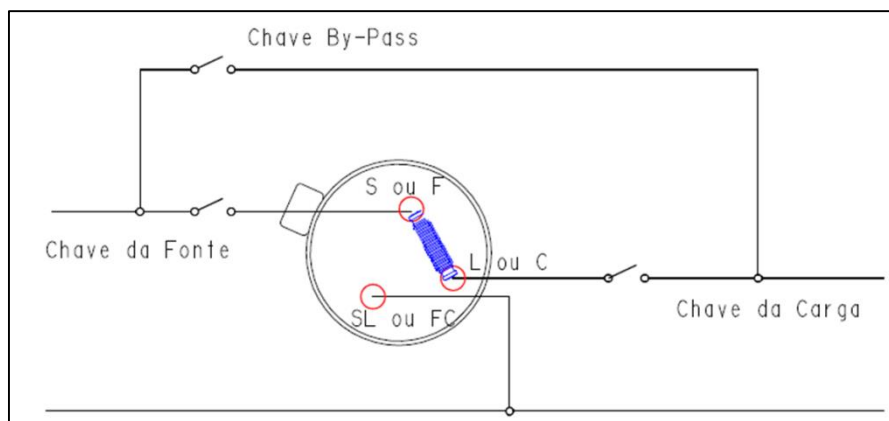


Figura II-8 – Diagrama de ligação de um regulador monofásico em uma rede monofásica. (Fonte: (Copel, 2010)).

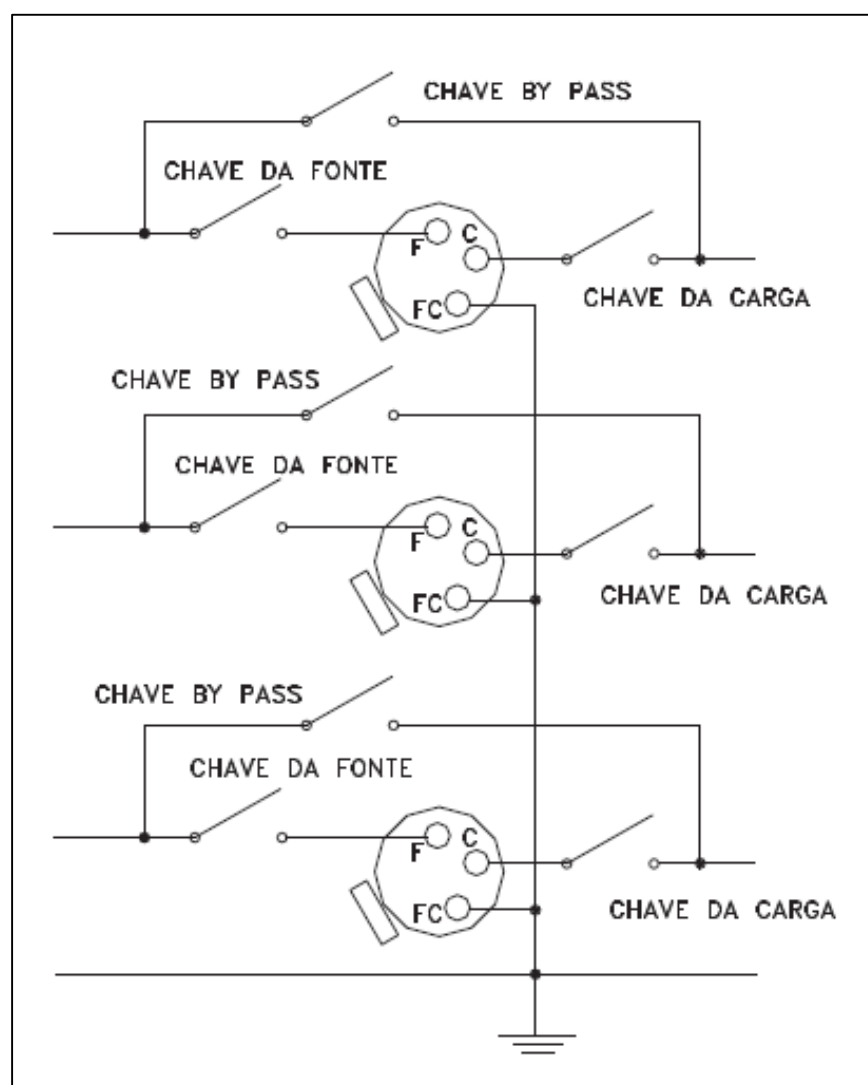


Figura II-9 – Diagrama de ligação três reguladores de tensão ligados em estrela em um sistema trifásico. (Fonte: (Toshiba, 2012)).

Em um regulador de tensão, além do acoplamento magnético entre o primário e secundário existe um acoplamento elétrico. A Figura II-10 representa esta situação.

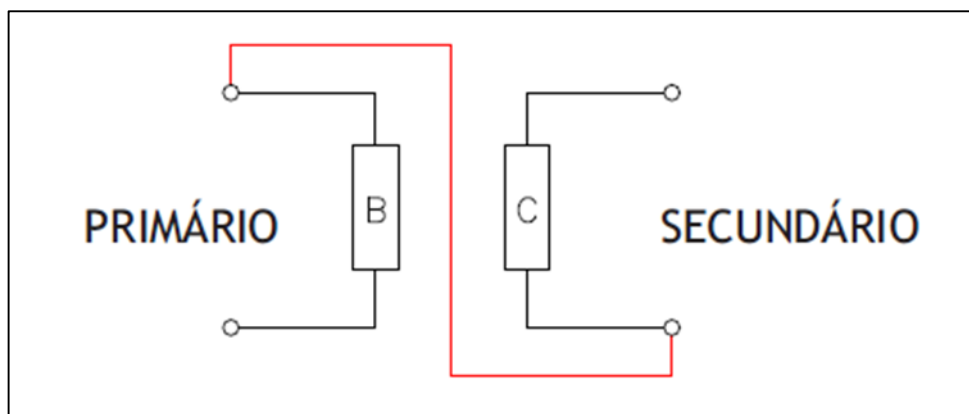


Figura II-10 – Diagrama representando o acoplamento elétrico e magnético entre o primário e secundário de um regulador de tensão. (Fonte: (Toshiba, 2012)).

A forma de conexão elétrica entre o primário e o secundário define se o regulador de tensão irá trabalhar com elevador ou abaixador de tensão. As Figuras II-11 e II-12 representam respectivamente a ligação para ele trabalhar como elevador e abaixador.

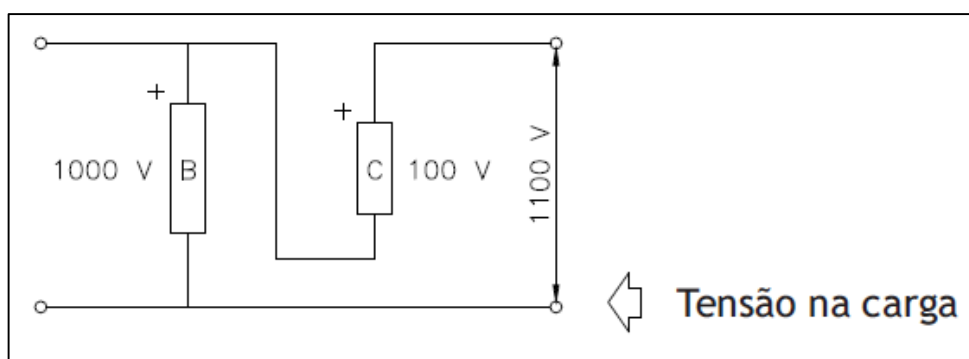


Figura II-11 – Diagrama representando o acoplamento elétrico do regulador como elevador de tensão. (Fonte: (Toshiba, 2012)).

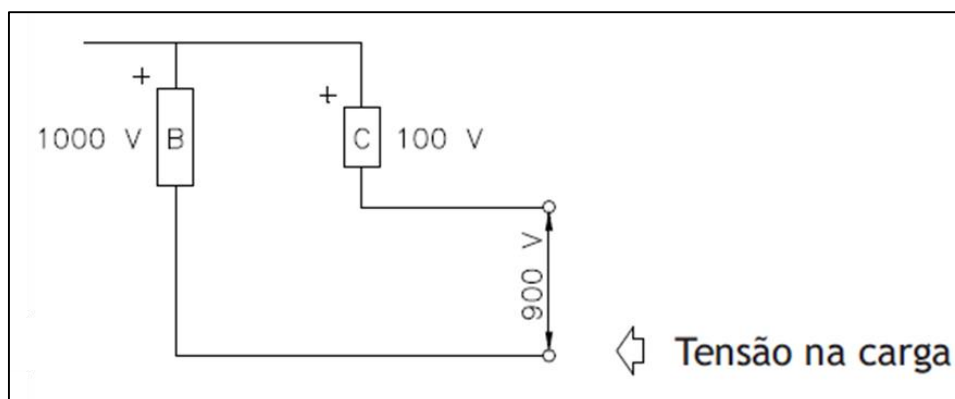


Figura II-12 – Diagrama representando o acoplamento elétrico do regulador como abaixador de tensão. (Fonte: (Toshiba, 2012)).

Observando a Figura II-13 nota-se que é a polaridade das bobinas que determina a ligação elétrica para o autotransformador funcionar como abaixador e elevador. É utilizada uma chave inversora de polaridade no circuito para possibilitar a conexão das bobinas com as polaridades desejadas, conforme a necessidade. O diagrama abaixo representa a utilização desta chave inversora.

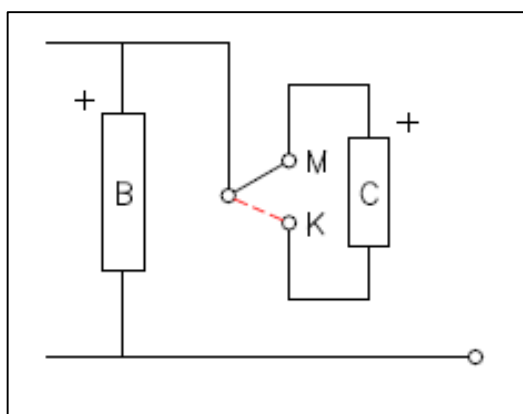


Figura II-13 – Diagrama representando a chave inversora (Fonte: (Toshiba, 2012)).

Existe ainda a necessidade de comutar os taps sem interromper a carga. Por exemplo: Se a carga estiver ligada no tap 1 e existir a necessidade de comutar para o tap 2, como fazer para não interromper o circuito? Esta situação é representada na Figura II-14.

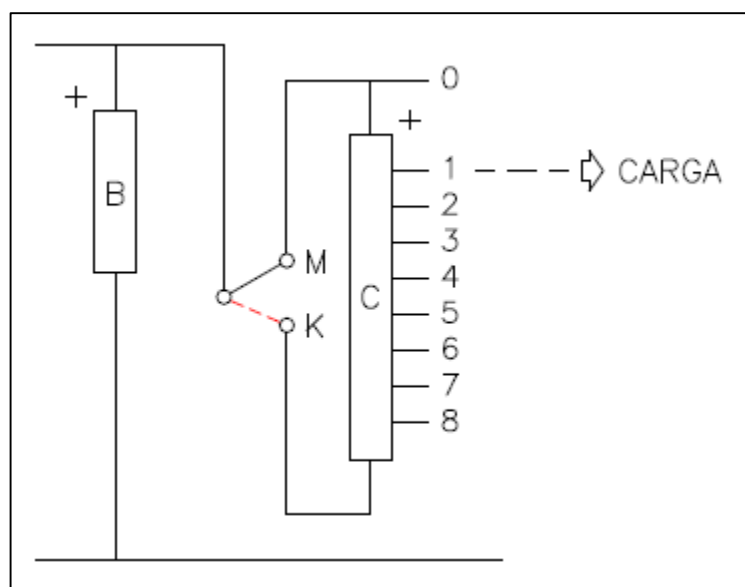


Figura II-14 – Diagrama representando a carga ligada no tap 1 (Fonte: (Toshiba, 2012)).

Para solucionar esta situação é adicionado um reator ao circuito. Enquanto uma das pernas do reator se move para outro tap, a carga continua alimentada pela outra perna que

ficou no tap anterior. Por meio deste dispositivo é possível fazer a comutação de taps sem interromper a alimentação da carga. Esta solução é representada na Figura II-15.

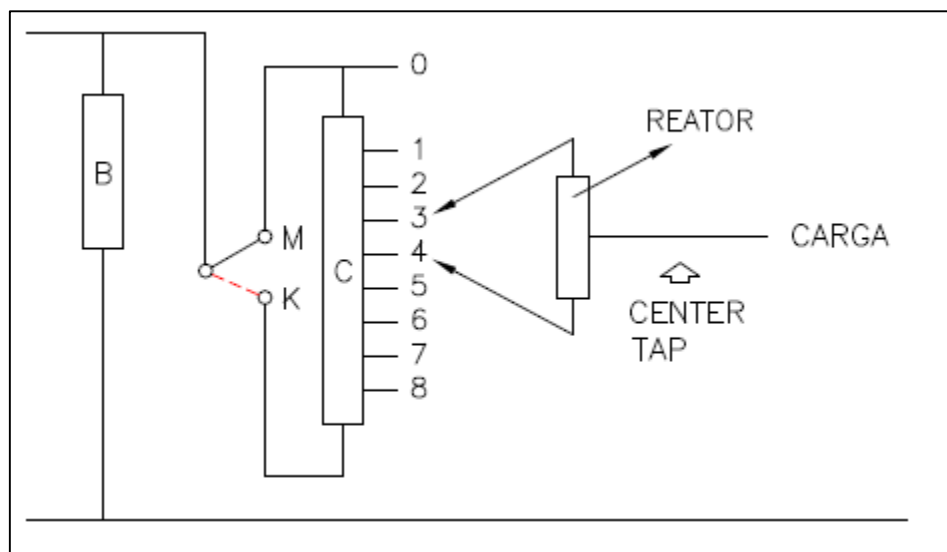


Figura II-15 – Diagrama representando o reator utilizado no regulador de tensão. (Fonte: (Toshiba, 2012)).

Classificação dos Consumidores

Conforme o módulo 1 do PRODIST, são atendidos via rede de distribuição consumidores do grupo A e do grupo B.

Grupo A: Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo nos termos definidos para opção do consumidor, caracterizado pela estruturação tarifária binômia e subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) Subgrupo A4 - tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV.
- b) Subgrupo AS - tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

Grupo B: Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, excluindo-se as unidades consumidoras do Subgrupo AS, ou, ainda, atendidas em tensão igual e superior a 2,3 kV e faturadas neste Grupo nos termos definidos para opção do consumidor, caracterizado pela estruturação tarifária monômia e subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) Subgrupo B1 - residencial.
- b) Subgrupo B1 - residencial baixa renda.
- c) Subgrupo B2 - rural.
- d) Subgrupo B2 - cooperativa de eletrificação rural.

- e) Subgrupo B2 - serviço público de irrigação.
- f) Subgrupo B3 - demais classes.
- g) Subgrupo B4 - iluminação pública.

Ferramenta de Análise Utilizada

Executou-se o estudo do alimentador por meio do programa PSS ADEPT. Trata-se de um programa da SIEMENS para rodar fluxo de potência em sistemas elétricos.

O PSS ADEPT é uma ferramenta que pode ser utilizada para planejamento e projeto de sistemas elétricos. Com ele é possível rodar fluxo de potência, calcular correntes de curto-circuito, realizar análises de contingência.

Nos próximos itens são descritos passo-a-passo o caminho percorrido para o estudo do alimentador em questão.

Para realizar simulações de fluxo de potência com os alimentadores estudados, necessitou-se converter o alimentador do sistema georeferenciado da empresa de energia elétrica para o programa de fluxo. Para cumprir esta etapa utilizou-se um conversor já existente.

Descrição do Arquivo Obtido com o Extrator

O extrator de dados utilizado fornece três arquivos, sendo:

- a) **Nome.dat**: Neste arquivo constam coordenadas dos nós, fontes relacionadas aos respectivos nós, condutores e dispositivos de rede relacionados aos seus respectivos nós.
- b) **Nome.dat.pelch.txt**: Neste arquivo constam o tipo de equipamento, o nó de referência e o seu número.
- c) **Nome.dat.peltr.txt**: Neste arquivo constam o nó de referência, o número do trafo no formato (número-mono/trif-potência), o código de local, e o número da instalação. Nem todos os transformadores citados neste arquivo terão um nó correspondente no arquivo (nome.dat), pois a extração simplificou o circuito. Ou seja, alguns transformadores estarão agrupados.

As primeiras linhas deste arquivo são o título. Estes dados estão transcritos abaixo.

EP

01

31/10/2013

Comment

2013

0.00

13.8

END/ TITLE

Após a linha END/TITLE são fornecidos alguns parâmetros utilizados pelo programa de fluxo. Estes parâmetros estão identificados nas Figuras II-17 e II-18..

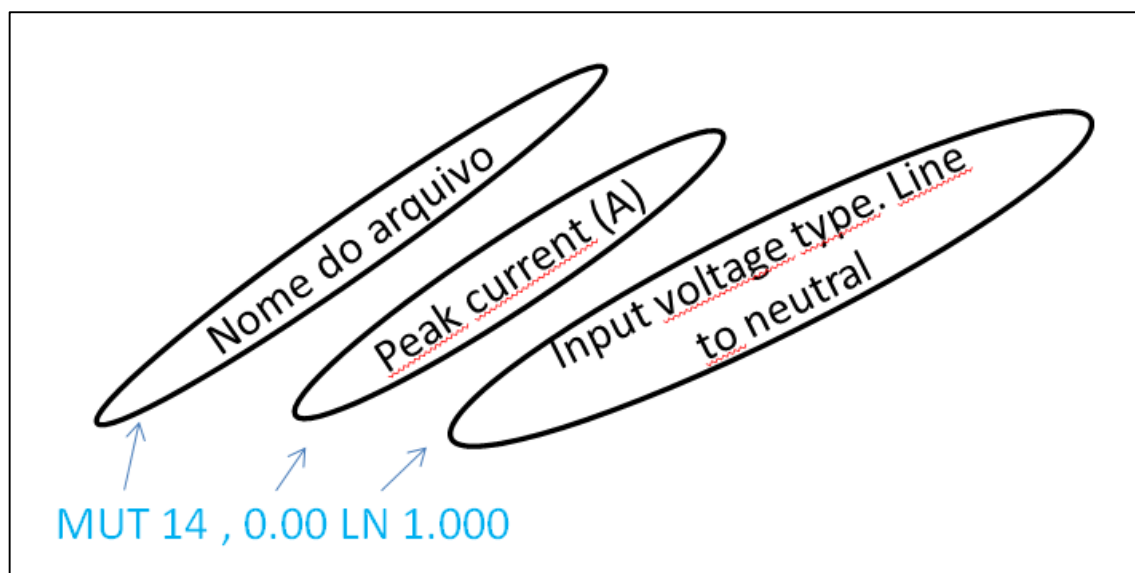


Figura II-16 – Descrição do arquivo extraído.

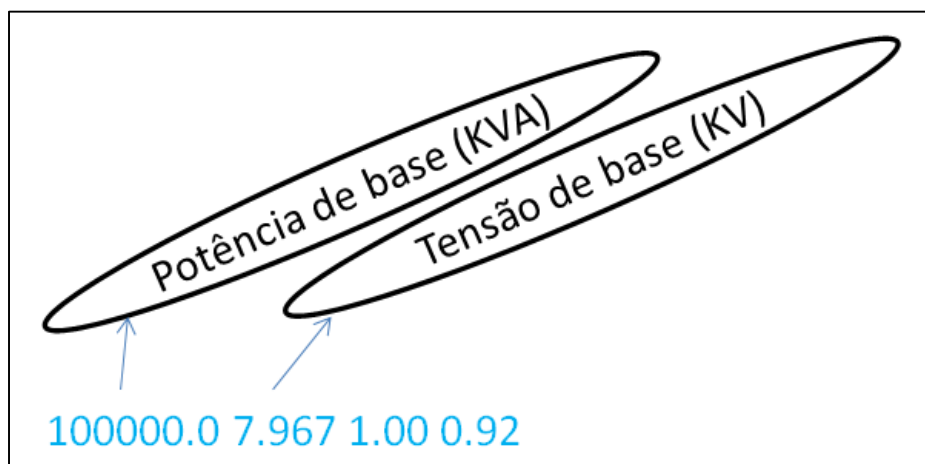


Figura II-17 – Descrição do arquivo extraído.

Após a linha END/ PARAMS são fornecidos os nós, conforme indicado na Figura II-19.

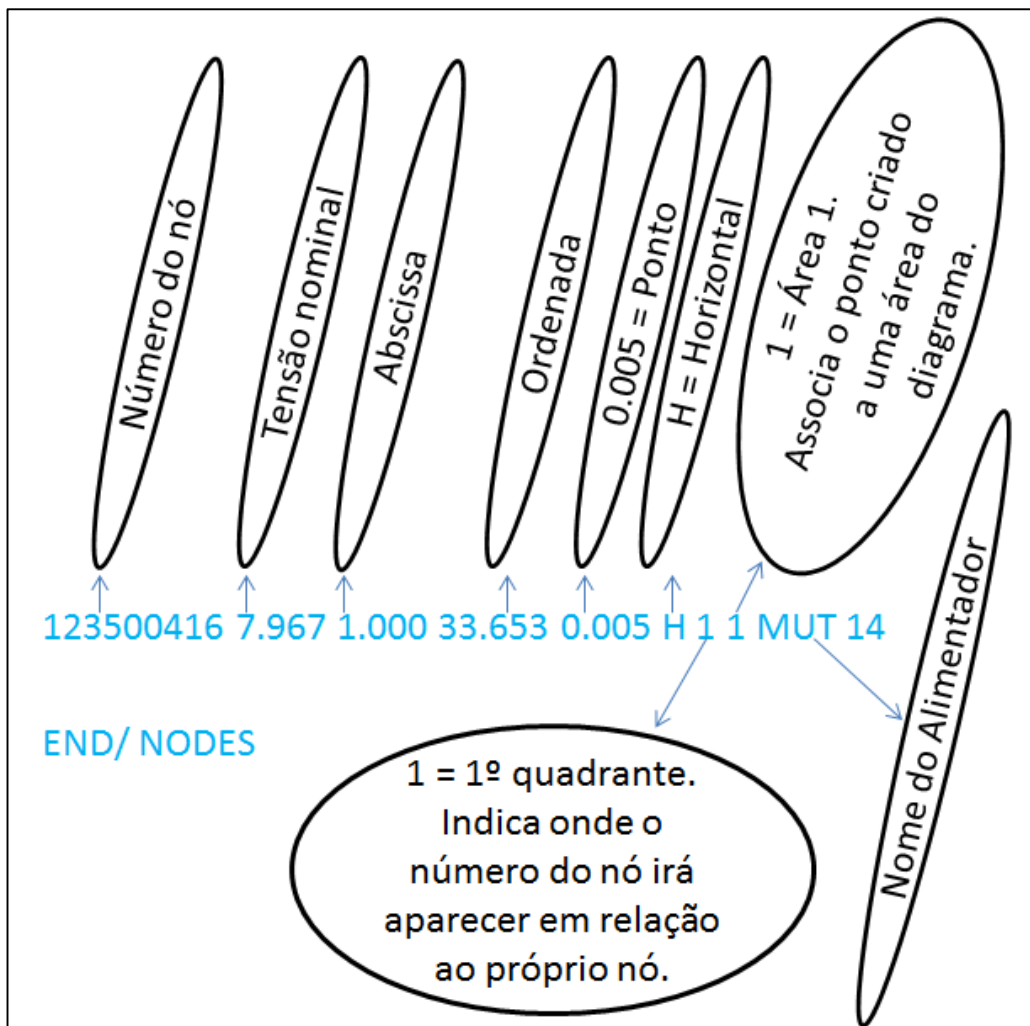


Figura II-18 – Descrição do arquivo extraído.

Após a linha END/ NODES são fornecidos os dados das fontes, sendo:

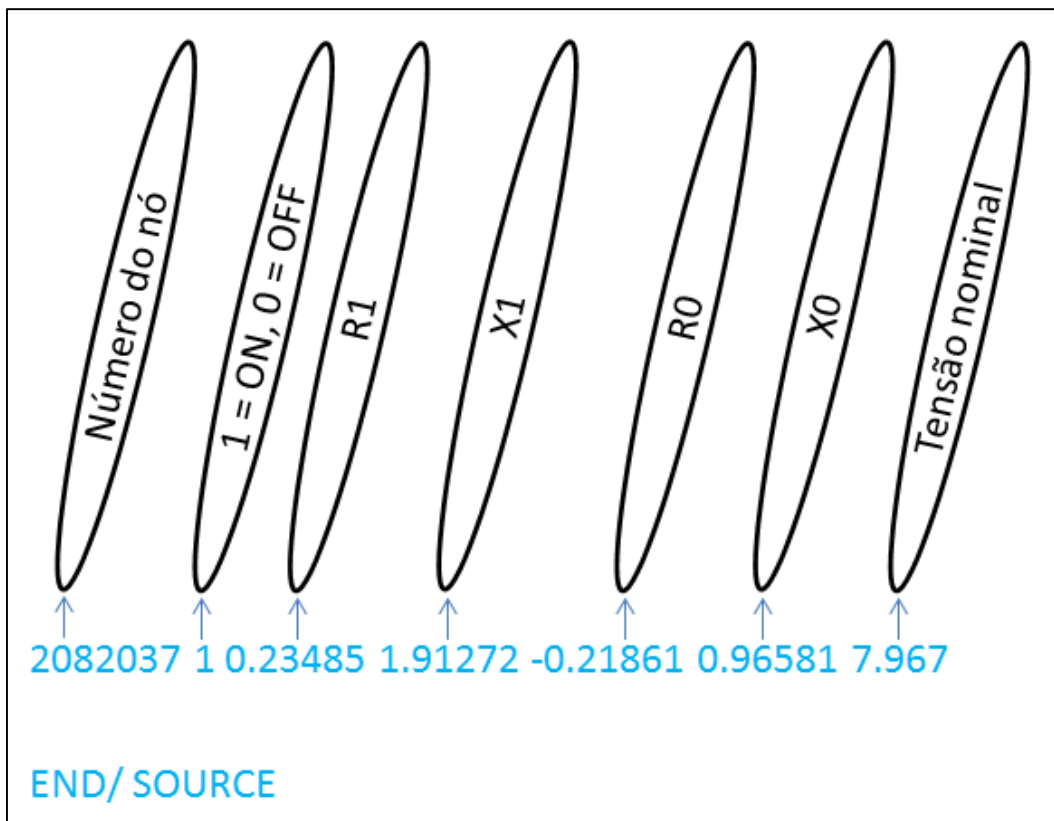


Figura II-19 – Descrição do arquivo extraído.

Para tornar mais clara a interpretação da Figura II-20, segue abaixo uma pequena descrição de cada item.

- Número do nó: Número do nó onde a fonte estará conectada.
- 1=on, 0 = off: Indica se a fonte estará em serviço ou fora de serviço.
- R1: Resistência de sequência positiva.
- X1: Reatância de sequência positiva.
- R0: Resistência de sequência zero.
- X0: Reatância de sequência zero.

Após a linha END/ SOURCE são fornecidos os condutores e dispositivos de manobra, sendo:

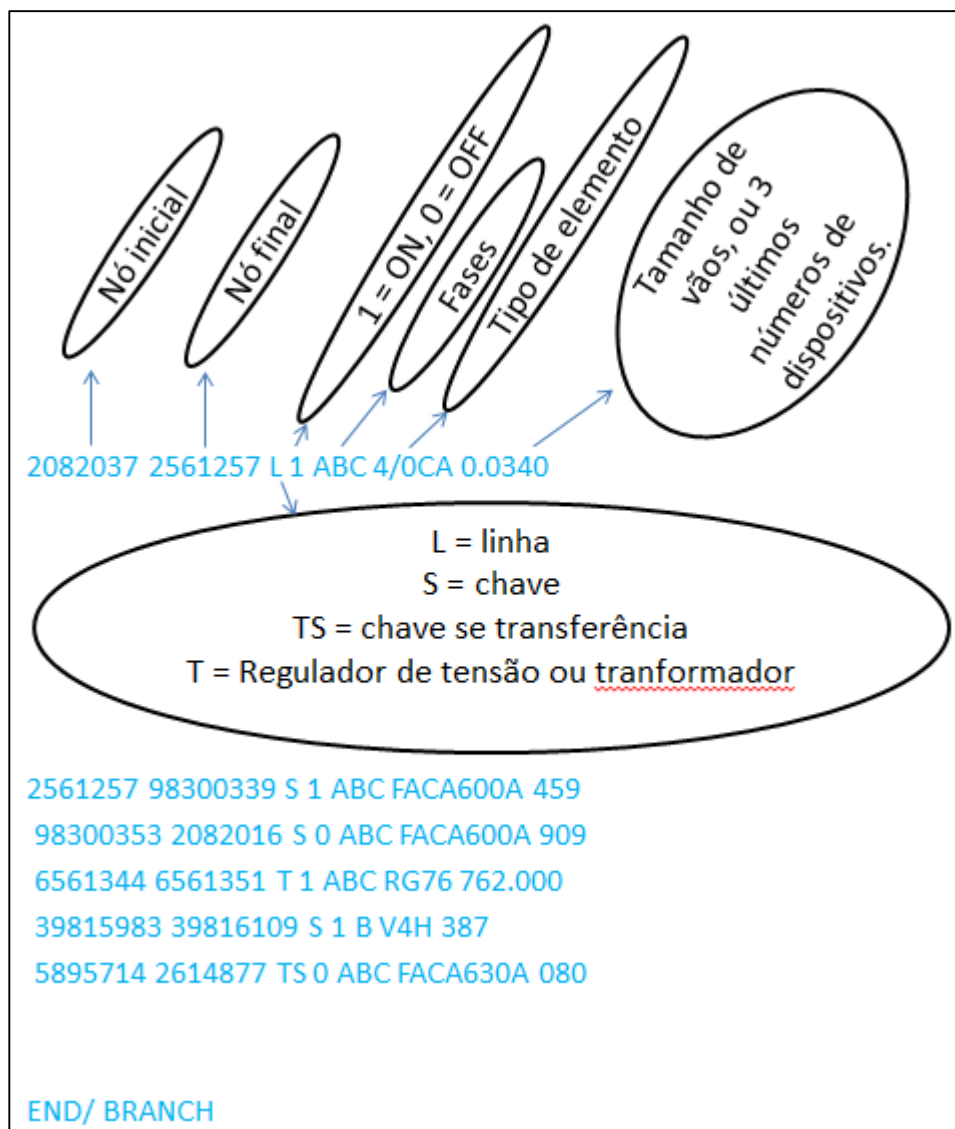


Figura II-20 – Descrição do arquivo extraído.

Com o objetivo de tornar mais clara a interpretação dos dados importados, abaixo algumas linhas de exemplo são apresentadas com sua respectiva interpretação.

2082037 2561257 L 1 ABC 4/0CA 0.0340

Vão entre os nós indicados, trifásico, cabo 4/0CA, com 0,0340 km.

2561257 98300339 S 1 ABC FACA600A 459

Chave fechada entre os nós indicados, trifásica.

98300353 2082016 S 0 ABC FACA600A 909

Chave aberta entre os nós indicados, trifásica.

6561344 6561351 T 1 ABC RG76 762.000

Regulador de tensão entre os nós indicados, 76 kVA.

39815983 39816109 S 1 B V4H 387

Religador monofásico entre os nós indicados, tipo V4H.

5895714 2614877 TS 0 ABC FACA630A 080

Chave aberta entre os nós indicados, trifásica.

Após a linha END/ BRANCH são fornecidos os ajustes dos reguladores de tensão em PU:

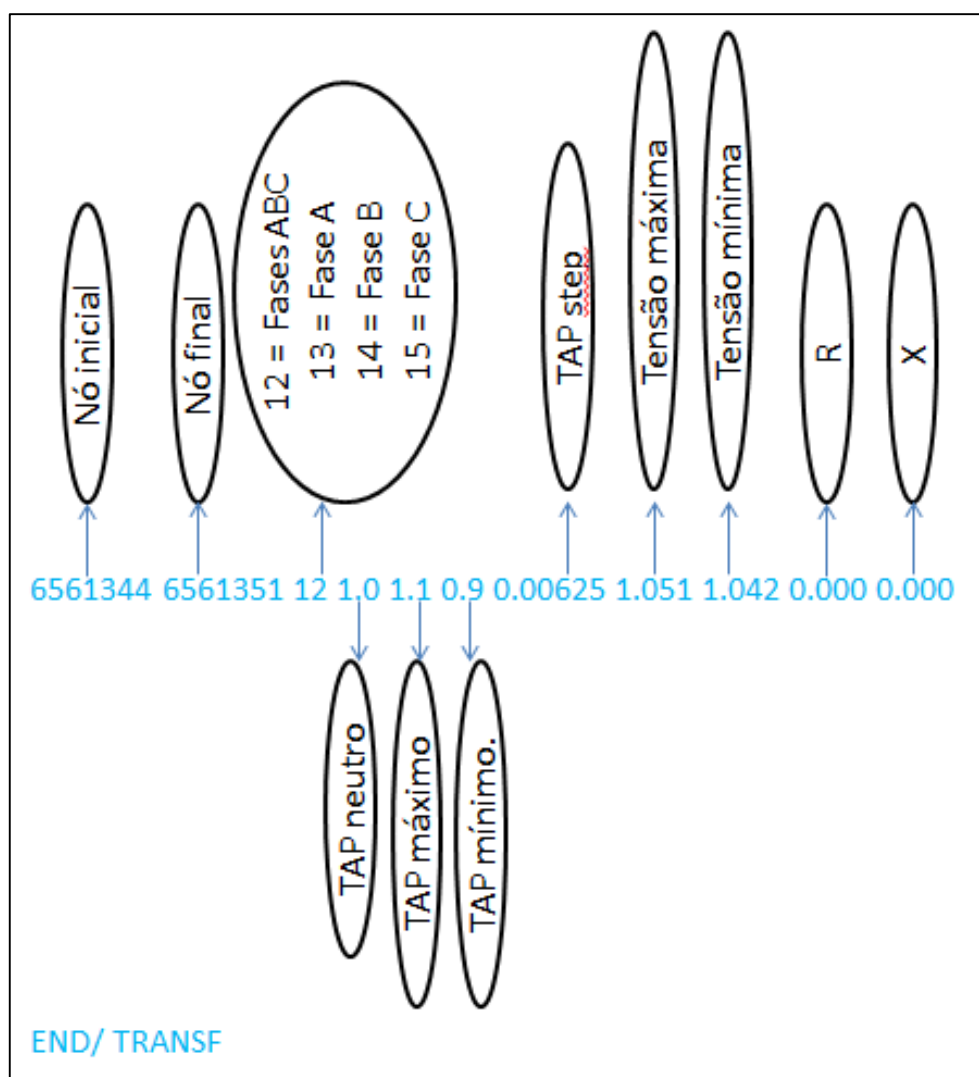


Figura II-21 – Descrição do arquivo extraído.

Após a linha END/ TRANSF são fornecidos os dados das cargas, sendo:

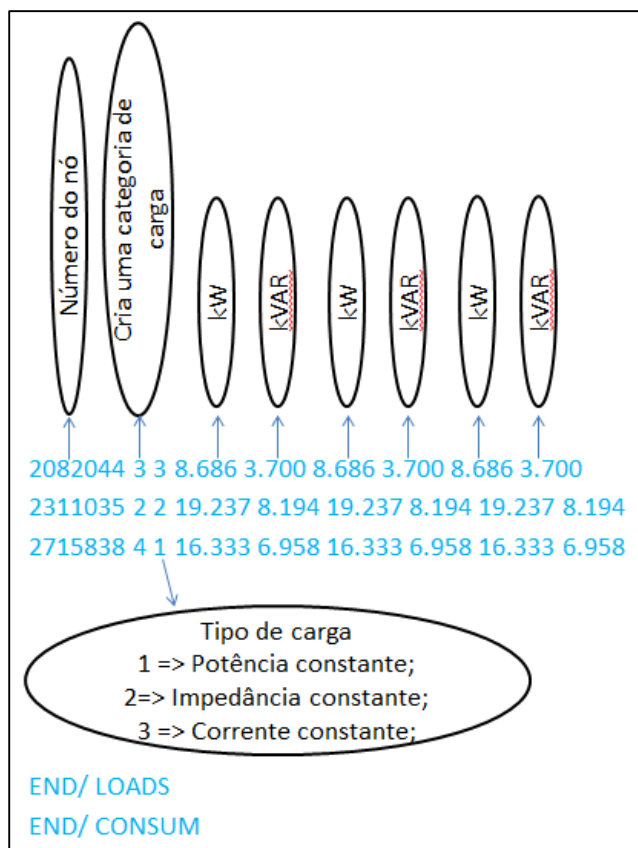


Figura II-22 – Descrição do arquivo extraído.

Após a linha END/ CONSUM são fornecidos os dados dos capacitores, sendo:

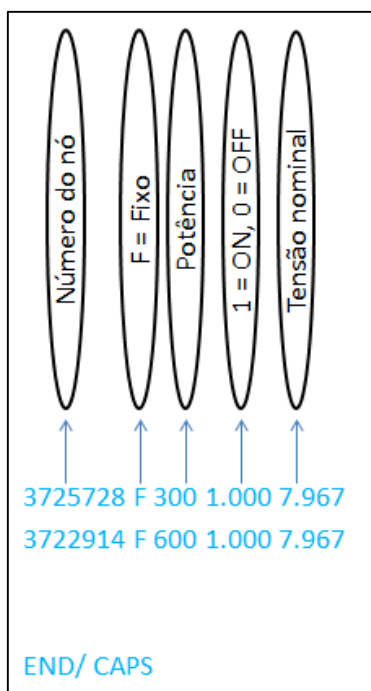


Figura II-23 – Descrição do arquivo extraído.

No arquivo “Nome.dat.pelch.txt” constam o tipo de equipamento, o nó de referência e o seu número, sendo:

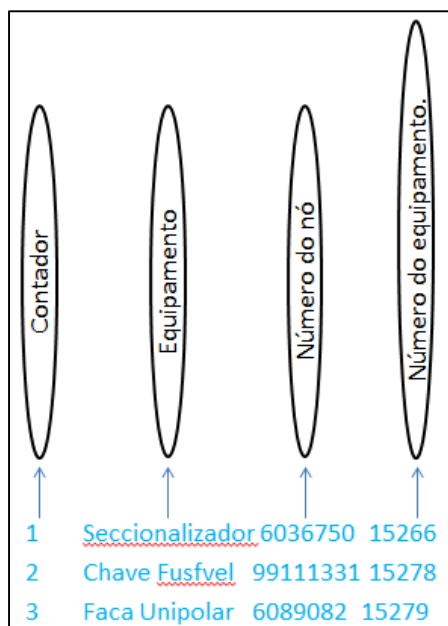


Figura II-24 – Descrição do arquivo extraído.

No arquivo “Nome.dat.peltr.txt” constam o nó de referência, o número do trafo no formato (número-mono/trif-potência), o código de local, e o número da instalação. Nem todos os transformadores citados neste arquivo terão um nó correspondente no arquivo (nome.dat), pois a extração simplificou o circuito. Ou seja, alguns transformadores estarão agrupados, sendo:

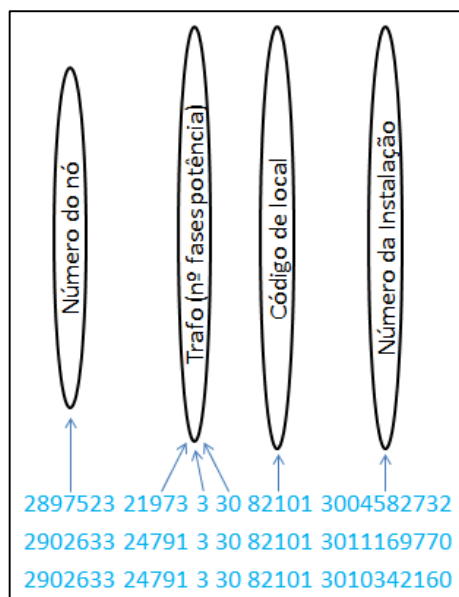


Figura II-25 – Descrição do arquivo extraído.

LIMITES DE TENSÃO CONFORME PRODIST

Os limites de tensão que devem ser cumpridos no atendimento a consumidores atendidos via sistema elétrico de distribuição estão definidos no módulo 8 do PRODIST. Este módulo trata sobre “Qualidade da Energia Elétrica”.

Este módulo do PRODIST aborda a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Neste tópico é dada ênfase à qualidade do produto. Mais especificamente aos valores de referência relativos à conformidade da tensão.

A ANEEL estabelece por meio deste módulo limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente. Conforme a (ANEEL, 2010), o termo “conformidade de tensão elétrica” refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos.

Considerando que o sistema em estudo neste trabalho possui a tensão nominal de linha igual a 13,8 KV, serão considerados os limites declarados na tabela abaixo.

Tabela II-2 – Limites de Tensão conforme PRODIST.

Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV	
Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$