

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM/RS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

DIOGO ANTONIO BOLZAN

**ESTUDO E ANÁLISE DA COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE EM PROTEÇÕES
DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO RURAL**

ERECHIM-RS

2019

DIOGO ANTONIO BOLZAN

**ESTUDO E ANÁLISE DA COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE EM PROTEÇÕES
DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO RURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim-RS.

Orientador: Prof. Esp. Ricardo Arpini Souza.

ERECHIM-RS

2019

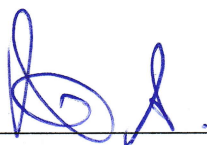
DIOGO ANTONIO BOLZAN

**ESTUDO E ANÁLISE DA COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE EM
PROTEÇÕES DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO RURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.

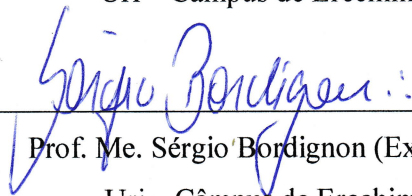
Erechim-RS, 27 de novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Esp. Ricardo Arpini Souza (Presidente/Orientador)

Uri – Câmpus de Erechim-RS.



Prof. Me. Sérgio Bordignon (Examinador)

Uri – Câmpus de Erechim-RS



Prof. Me. Camila Sampaio dos Reis (Examinadora)

Uri – Câmpus de Erechim-RS

Dedico este trabalho à minha família, que nunca mediu esforços para que eu alcançasse todos os meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

De início, agradeço à Deus, meu protetor de todos os dias e momentos, por ter tornado meu sonho possível.

Agradeço à minha família, pela ajuda e incentivo prestados para que eu alcançasse o sonho de ser bacharel em engenharia elétrica.

Agradeço à minha namorada, por estar sempre ao meu lado me incentivando e acreditando no meu potencial.

Meus sinceros agradecimentos aos colegas da Permissionária, Eng. Eletricista Dilamar de Almeida, Roberto Remus Santolin e Samir Elias, por todo o auxílio prestado para a elaboração do presente trabalho.

Nesta oportunidade, agradeço também ao meu orientador Prof. Esp. Ricardo Arpini Souza, pelos ensinamentos a mim repassados, pela paciência e dedicação para que eu realizasse um bom trabalho de conclusão de curso.

Por fim, agradeço a todos que comigo convivem, que eu amo e que, de certa forma, acompanharam esta longa e difícil caminhada.

Seu trabalho vai preencher uma parte grande da sua vida, e a única maneira de ficar realmente satisfeito é fazer o que você acredita ser um ótimo trabalho. E a única maneira de fazer um excelente trabalho é amar o que você faz.

(Steve Jobs)

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a coordenação e a seletividade em redes de distribuição de energia elétrica de média tensão rural. O método utilizado foi o analítico descritivo, através da técnica de pesquisa bibliográfica e de estudo de caso. Para isso, foram apresentados, inicialmente, conceitos e modalidades de redes de distribuição. Após, foi realizado o estudo da problemática, ou seja, a falta de coordenação e seletividade do sistema. E, por fim, foram apresentadas as conclusões e os resultados obtidos por meio da análise de casos reais. O trabalho teve como alicerce, especialmente, a ANEEL e a Permissionária "X". Diante da grande quantidade de falhas que acometem os sistemas de redes rurais, verificou-se a importância da análise de casos práticos, a fim de manter a confiabilidade da distribuição de energia nesses locais. Portanto, foram realizadas simulações da coordenação dos equipamentos de proteção da rede atual e, posteriormente, com as propostas de melhorias. Foi analisada, ainda, a viabilidade técnica e econômica dessas propostas, visando um tempo estimado para o retorno do investimento. Diante dos casos práticos estudados, percebeu-se que é de grande importância realizar a coordenação e seletividade nos equipamentos de proteção das redes de distribuição de média tensão rural.

Palavras-chave: Coordenação. Seletividade. Redes. Distribuição. Sistema Elétrico de Potência. Proteção.

ABSTRACT

The present work aimed to analyze the coordination and selectivity in rural medium voltage electricity distribution networks. The method used was the descriptive analytical, through the technique of bibliographic research and case study. For that, initially, concepts and modalities of distribution networks were presented. After that, the study of the problem was performed, that is, the lack of coordination and selectivity of the system. Finally, the conclusions and results obtained through the analysis of real cases were presented. The work was especially based on ANEEL and Permissionaire "X". Given the large number of failures that affect the rural network systems, it was verified the importance of the analysis of practical cases, in order to maintain the reliability of the power distribution in these places. Therefore, simulations were performed of the coordination of the protection equipment of the current network and, subsequently, with the proposed improvements. It was also analyzed the technical and economic feasibility of these proposals, aiming at an estimated time for return on investment. Given the practical cases studied, it was realized that it is very important to coordinate and selectively protect the equipment of rural medium voltage distribution networks.

Keywords: Coordination. Selectivity. Networks. Distribution. Energy. Protection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Circulação de corrente para um defeito trifásico	28
Figura 2 - Circulação de corrente para um defeito bifásico	29
Figura 3 - Circulação de corrente para um defeito monofásico	30
Figura 4 - Chave Fusível	31
Figura 5 - Chave fusível religadora	32
Figura 6 - Tipos de elos fusíveis (botão e argola)	34
Figura 7 - Curva de atuação tempo versus corrente dos elos fusíveis tipo K.....	35
Figura 8 - Modelo de seccionador de controle eletrônico	40
Figura 9 - Posição dos elos fusíveis protegidos e protetor	45
Figura 10 - Módulos que constituem o PRODIST	47
Figura 11 - Diagrama unifilar dos alimentadores CZ e JA.....	52
Figura 12 - Configurações dos parâmetros do religador 1701	53
Figura 13 - Coordenação atual da proteção do alimentador JA	54
Figura 14 - Curva de corrente de carga das três fases do alimentador	55
Figura 15 - Configurações dos parâmetros do religador 2	56
Figura 16 - Coordenação atual da proteção da rede CZ	57
Figura 17 - Curva de corrente de carga do alimentador CZ	58
Figura 18 - Indicadores limites que a Permissionária "X" deve garantir para a ANEEL.....	60
Figura 19 - Comparação do limite do indicador DEC com os alimentadores CZ e JA.....	61
Figura 20 - Comparação do limite do indicador FEC com os alimentadores CZ e JA	62
Figura 21 - Diagrama unifilar resumido dos alimentadores CZ e JA.....	63
Figura 22 - Diagrama unifilar resumido da fonte de JA alimentando os dois trechos	65
Figura 23 - Diagrama unifilar resumido das fontes de CZ alimentando os dois alimentadores	66
Figura 24 - Coordenação entre o religador 1701 e os elos protetores.	73
Figura 25 - Coordenação entre o religador 2 e os elos protetores.	74
Figura 26 - Coordenação entre o religador existente no início, com o novo religador localizado no fim do alimentador e um elo de 25k.....	75
Figura 27 - Coordenação entre o religador 2, o novo religador 17413 e um elo de 25k.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequências típicas de ocorrências de curtos-circuitos	27
Tabela 2 - Dados do alimentador CZ referentes a cada interrupção dos dispositivos.....	59
Tabela 3 - Apuração do DEC e FEC realizado nos últimos 12 meses do alimentador CZ	59
Tabela 4 - Dados do alimentador JA referentes a cada interrupção dos dispositivos	59
Tabela 5 - Apuração do DEC e FEC realizado nos últimos 12 meses do alimentador JA.....	60
Tabela 6 - Corrente de curto-circuito monofásica simétrica mínima do início e fim do alimentador CZ.....	64
Tabela 7 - Corrente de curto-circuito monofásica simétrica mínima do início e fim do alimentador JA.....	64
Tabela 8 - Corrente de curto-circuito monofásica simétrica mínima nos pontos abaixo com a fonte de JA alimentando	65
Tabela 9 - Corrente de curto-circuito monofásica simétrica mínima nos pontos abaixo com a fonte de CZ alimentando	66
Tabela 10 - Comparação das correntes de curto-circuito monofásica simétrica mínima dos pontos de conexão dos alimentadores	67
Tabela 11 - Comparação das correntes de curto-circuito monofásica simétrica mínima do ponto final da JA com o ponto inicial da CZ, quando a fonte de JA está alimentando.....	67
Tabela 12 - Comparação das correntes de curto-circuito monofásica simétrica mínima do ponto final da CZ com o ponto inicial da JA, quando a fonte de CZ está alimentando	68
Tabela 13 - Alteração dos equipamentos de proteção do alimentador JA.....	69
Tabela 14 - Alteração dos equipamentos de proteção do alimentador CZ.....	70
Tabela 15 - Valores para as propostas de alterações	77
Tabela 16 - Valores médios gastos com a manutenção dos alimentadores	78

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
SEP	Sistema Elétrico de Potência
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
CPFL	Companhia Paulista de força e luz
PU	Por unidade
RGE	Rio Grande Energia
RL	Religador
GED	Gerenciamento eletrônico de documentos
MRT	Monofilar com retorno por terra
SF6	Hexafluoreto de enxofre
TPs	Transformadores de potência
BT	Baixa tensão
MT	Média tensão
PAC	Prestação anual de contas
NA	Normalmente aberta
A	Amperes
FER	Frequência Equivalente de Reclamação
<i>INRUSH</i>	Corrente elétrica de energização

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Redes de distribuição	17
2.1.1	Redes de distribuição aéreas	18
2.1.2	Redes de distribuição aéreas urbanas	19
2.1.3	Redes de distribuição aéreas rurais.....	20
2.1.4	Alimentadores de distribuição de energia elétrica.....	20
2.2	Sistema de proteção	20
2.3	Tipos de falta.....	21
2.3.1	Falta transitória	22
2.3.2	Falta permanente.....	22
2.4	Componentes simétricas.....	23
2.4.1	Componentes de sequência positiva	23
2.4.2	Componentes de sequência negativa	24
2.4.3	Componentes de sequência zero.....	24
2.5	Valores por unidade pu.....	24
2.5.1	Valor base das grandezas.....	25
2.5.1.1	Mudança de base de uma impedância	25
2.6	Curto-circuito	26
2.6.1	Correntes simétricas e assimétricas de curto-circuito.....	27
2.6.1.1	Curto-circuito trifásico	28
2.6.1.2	Curto-circuito bifásico	29
2.6.1.3	Curto-circuito monofásico ou fase-terra.....	29
2.7	Equipamentos de proteção.....	30
2.7.1	Chave Faca	30
2.7.2	Chave Fusível	30
2.7.2.1	Chave fusível religadora.....	32
2.7.3	Elo Fusível.....	33
2.7.4	Religador	36

2.7.4.1 Classificação dos Religadores	38
2.7.5 Seccionador	39
2.7.6 Disjuntor	41
2.7.7 Relé de Proteção	42
2.7.7.1 Classificação dos Relés	42
2.8 Filosofia de Proteção	44
2.8.1 Critérios de coordenação entre elos fusíveis	44
2.8.2 Critérios de coordenação entre religadores e elos fusíveis.....	46
2.9 Prodist.....	46
2.9.1 Prodist Módulo 1	46
2.9.2 Prodist Módulo 8	47
2.9.2.1 Indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica.....	48
2.10 Reconfiguração de redes	49
3 METODOLOGIA.....	51
3.1 Estudo de caso	51
3.1.1 Alimentador de distribuição JA.....	52
3.1.1.1 Análise da proteção atual do alimentador JA	53
3.1.2 Alimentador de distribuição CZ	55
3.1.2.1 Análise da proteção atual do alimentador CZ	56
3.2 Apuração dos indicadores de continuidade	58
3.3 Limites dos indicadores coletivos	60
3.5 Desempenho dos indicadores coletivos	61
3.6 Análise de três casos reais	62
3.6.1 Caso 1: Ponto de conexão entre os alimentadores abertas	63
3.6.2 Caso 2: Ponto de conexão fechado com fonte de JA alimentando.....	64
3.6.3 Caso 3: Ponto de conexão fechado com fonte fornecendo energia ao alimentador CZ..	65
3.7 Comparação das correntes de curto-circuito.....	66
3.8 Proposta de melhorias	68
3.8.1 Proposta de melhorias no alimentador JA	69
3.8.2 Proposta de melhorias no alimentador CZ	70
3.8.3 Proposta de parametrização do novo RL em caso de contingências	71
4 RESULTADOS E SIMULAÇÕES	72
4.1 Coordenação e seletividade.....	72
4.1.1 Coordenação e seletividade dos alimentadores CZ e JA.....	72

4.1.2 Coordenação e seletividade do alimentador JA na função fonte-carga.....	74
4.1.3 Coordenação e seletividade do alimentador CZ na função fonte-carga	75
4.2 Viabilidade econômica	77
4.2.1 Custo para a realização das alterações.....	77
4.2.2 Custos de manutenção	78
5 CONCLUSÃO.....	79
5.1 Perspectivas futuras	80
REFERÊNCIAS	81
ANEXOS	84

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma das formas de energia que o homem mais utiliza na atualidade. Ela proporciona à sociedade, trabalho, produtividade e desenvolvimento, assim como conforto e comodidade aos seus cidadãos. Em função disso, a sociedade está cada vez mais dependente do fornecimento dessa energia e, conseqüentemente, mais suscetível às falhas do sistema elétrico (RIBEIRO, 2008).

O presente trabalho tem como objetivo analisar os alimentadores de distribuição rurais de média tensão. Para a análise e discussão sobre o tema, foi utilizado o método indutivo, analítico-descritivo e o estudo de caso, dividindo-se o trabalho em três capítulos.

De grande valia o estudo do presente trabalho, na medida em que demonstrará a necessidade da coordenação e da seletividade em um sistema de distribuição de energia, evitando, assim, o risco de perturbações causadas por diversos fenômenos naturais e acidentais, que provocam a interrupção no fornecimento de energia aos consumidores finais, bem como transtornos e prejuízos materiais, tanto para os clientes, como para as permissionárias.

Reitera-se, portanto, que se torna propício e de suma importância o estudo da coordenação e da seletividade em um alimentador de distribuição, para que a energia seja transmitida ao maior número de consumidores possíveis, dando-lhes a oportunidade de desfrutarem dela sem interrupções, o que, inclusive, irá contribuir para o desenvolvimento de toda a sociedade.

No primeiro capítulo foi abordado o Sistema Elétrico de Potência (SEP), que é constituído por subsistemas de geração, transmissão e distribuição, os quais são responsáveis pela transmissão de energia, da geração até os centros de carga, por meio de uma grande área geográfica e pela distribuição da mesma aos consumidores (VIANA FILHO, 2010).

Também foi destacado a respeito da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamenta critérios técnicos para um melhor desempenho na distribuição de energia, através de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST). Seus principais propósitos são garantir segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade em seus sistemas de distribuição, além da inspeção de outros fatores, como os indicadores de qualidade dos serviços prestados, que são: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC).

Outrossim, no segundo capítulo, foi demonstrada a metodologia de pesquisa, ou seja, apresentados os indicadores de continuidade de dois alimentadores de distribuição, bem como

o estudo de três casos reais. No caso 1, foram demonstradas dois alimentadores trabalhando de forma normal (ideal); no caso 2 e 3, foi demonstrado o momento em que uma das fontes de alimentação precisa suprir a demanda da outra. No caso, foram comparados, também, os indicadores de qualidade de energia, dos dois alimentadores de distribuição com os limites fornecidos pela ANEEL, bem como demonstrada a comparação das correntes de curto-circuito referentes aos três casos. Ainda, foi apresentada a situação atual do sistema de proteção dos alimentadores, bem como propostas para melhorias do sistema de proteção.

Por fim, no terceiro capítulo, foram apresentados os resultados e discussões, com a demonstração, através de simulações, das propostas de melhorias, analisando-se a viabilidade técnica-econômica dessas propostas.

Conclui-se, portanto, que a principal função de um sistema de proteção é assegurar a desconexão de todo o sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que faça operar fora dos limites previstos ou de parte dele. Para que todo o sistema de proteção atue com eficácia, é preciso que siga o conjunto de seletividade, coordenação, velocidade, segurança, sensibilidade e confiabilidade.

O estudo do presente trabalho torna-se de grande valia, na medida em que demonstrará a necessidade da coordenação e da seletividade em um sistema de distribuição de energia, evitando, assim, o risco de perturbações causadas por diversos fenômenos naturais e acidentais, que provocam a interrupção no fornecimento de energia aos consumidores finais, bem como transtornos e prejuízos materiais, tanto para os clientes, como para as permissionárias.

Reitera-se, portanto, que se torna propício e de suma importância o estudo da coordenação e da seletividade em um alimentador de distribuição, para que a energia seja transmitida ao maior número de consumidores possível, dando-lhes a oportunidade de desfrutarem dela sem interrupções, o que, inclusive, irá contribuir para o desenvolvimento de toda a sociedade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo de um sistema de proteção de dois alimentadores de distribuição aérea rural de média tensão, a fim de obter melhorias na rede realizando as alterações necessárias.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar os componentes e requisitos do sistema de proteção em alimentadores de distribuição de energia;
- Analisar os indicadores de continuidade de dois circuitos e comparar aos indicadores regulatórios, a fim de definir o estudo de caso;
- Analisar as correntes de curto-circuito em determinados pontos, bem como as correntes de carga;
- Realizar propostas de melhorias das condições dos alimentadores;
- Realizar simulações com as proteções atuais e, posteriormente, com as proteções alteradas;
- Analisar a viabilidade técnica-econômica das propostas de melhorias;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Redes de distribuição

Os sistemas de potência surgiram há mais de 100 anos. No início, discutia-se qual seria o sistema mais adequado para distribuir a energia elétrica. Com o passar dos anos, prevaleceu o sistema de corrente alternada, pela facilidade de elevar e reduzir níveis de tensão, já que apresentava um benefício na redução de perdas, em razão da condução de energia em menor corrente e maior tensão (BARROS et. al, 2014).

As redes de distribuição têm por escopo levar energia elétrica com qualidade até os consumidores finais de uma determinada região. No Brasil, essas redes normalmente são aéreas, sendo que suas características, juntamente com as do ambiente em que estão, contribuem para formar os seus índices de desempenho (COELHO, 2010).

Destaca-se que o consumidor recebe energia elétrica por meio de um sistema de distribuição. Veja-se:

O sistema de distribuição de energia elétrica conecta o sistema de geração e transmissão ao consumidor final de forma a alimentar desde consumidores de grande e médio porte (industriais, hospitais, grandes consumidores comerciais e de serviços) até consumidores de pequeno porte (residenciais, pequenos comércios). As redes de distribuição são compostas por linhas de alta, média e baixa tensão (CIPOLI, 1993 *apud* ALBANI; GOULART DA COSTA, 2017, p.16).

O sistema de energia elétrica, segundo Vilson Luiz Coelho (2010), é dividido em quatro níveis: geração; transmissão; sub-transmissão e distribuição. A energia, que é gerada em usinas, hidrelétricas, entre outros, é conduzida para centros de cargas por meio de linhas de sub-transmissão ou transmissão. Salienta-se que as linhas de sub-transmissão operam em níveis de tensão entre 34,5 e 138 kV e as linhas de transmissão operam em níveis superiores a 138 kV.

As distribuidoras operam circuitos que formam as redes primária e secundária de distribuição. As redes primárias operam com níveis de tensão entre 2,3 kV e 44 kV. Já as redes secundárias, operam em níveis de tensão entre 110 e 440 V. Geralmente, são conectadas à rede secundária as residências e comércios pequenos, enquanto que à rede primária, são conectados consumidores maiores, como, por exemplo, indústrias e shoppings, visto que necessitam de uma maior potência (BARROS et. al, 2014).

Em função da região geográfica no Brasil, as redes de distribuição primárias podem apresentar valores variados de tensão, tais como: 11,9 kV; 13,2 kV; 13,8 kV; 20 kV e 34,5 kV. Ademais, nas redes de distribuição secundárias os valores podem ser de 115 V; 127 V; 220 V e 380 V (BARROS et. al, 2014).

Uma das características do sistema de distribuição é a radialidade, a qual facilita a configuração e a manutenção dos equipamentos de proteção. Tais equipamentos tem a finalidade de impedir a propagação de falhas, como curto-circuitos, por exemplo. Observa-se que na ocorrência de uma falha no trecho principal de um alimentador, o fornecimento de energia é interrompido para todos os consumidores. Dessa forma, utilizam-se os sistemas de manobra, a fim de minimizar os efeitos causados por essas falhas (SPERANDIO, 2008).

2.1.1 Redes de distribuição aéreas

Os sistemas de distribuição de energia elétrica, usualmente, são radiais, com redes aéreas de média tensão, que podem ser monofásicas ou trifásicas, e levam a energia das subestações até os transformadores de distribuição. A partir daí, os consumidores finais recebem a energia por meio dos circuitos secundários de baixa tensão. Destaca-se que existem os circuitos troncos ou alimentadores, que possuem maior carga, e os circuitos ramais, que ramificam (COELHO, 2010).

Ainda segundo Coelho (2010), percebe-se que os postes, cruzetas, isoladores e ferragens compõem as estruturas suporte das redes aéreas de distribuição, apresentando configurações distintas em decorrência de aspectos técnico econômicos ou devido ao tipo de rede, que pode ser urbana ou rural.

Na grande maioria dos sistemas de distribuição de energia das cidades brasileiras, as redes são aéreas. Ao longo dos anos essas redes passaram a dividir-se em três tipos: isolada, compacta e convencional, por conta de possuírem um menor custo em relação a sua construção civil, quando comparado com os sistemas subterrâneos (RIBEIRO, 2008).

A rede de distribuição aérea isolada apresenta condutores dotados de isolamento, que podem ser até trançados. É uma rede mais cara e, portanto, utilizada apenas em situações especiais (BARROS et. al, 2014).

A rede de distribuição aérea compacta, apresenta condutores com uma camada de isolamento. Ela ocupa menor espaço e sofre um menor número de perturbações, em função de sua característica construtiva (BARROS et. al, 2014)

Insta consignar que as redes compactas de distribuição são uma boa opção para minimizar os problemas de falhas de energia, conforme a seguir transcrito:

Como alternativa para minimizar os problemas de falhas de energia, o uso de redes compactas de distribuição de energia elétrica é o mais indicado, por ser menos vulnerável às agressões naturais e dar maior segurança e confiabilidade ao sistema. Cabe destacar, ainda, que as redes aéreas compactas protegidas causam menor impacto no meio ambiente, tendo em vista que convivem de maneira harmoniosa com a arborização e minimizam os fatores de risco aos seres humanos (AZEVEDO, 2010 *apud* ALBANI; GOULART DA COSTA, 2017, p.13).

Ricardo Luis Gedra, Benjamim de Barros e Reinaldo Borelli (2014) ainda destacam a respeito da rede de distribuição aérea convencional, a qual é mais suscetível à ocorrência de defeitos. Nota-se:

Rede de Distribuição Aérea Convencional: É constituída de condutores nus (sem isolamento) ou condutores revestidos (dotados de capa de material plástico) fixados em isoladores apoiados sobre cruzetas metálicas, de madeira ou de material sintético. Esse tipo de rede é mais suscetível à ocorrência de defeitos (curto-circuitos), principalmente quando há contato de galhos de árvores com os condutores elétricos ou danos impostos pela queda de árvores durante as tempestades ou abaloamento de postes provocados por veículos.

Conforme frisa Coelho (2010), os transformadores e os equipamentos de proteção e manobra, são os principais equipamentos das redes aéreas de distribuição. Por vezes, o uso de reguladores de tensão e capacitores de potência podem ser necessários em redes longas, com o propósito de regular a tensão e compensar reativos.

2.1.2 Redes de distribuição aéreas urbanas

Na zona urbana, geralmente, o neutro da rede de distribuição é interligado à malha terra da subestação, onde o neutro do transformador é aterrado solidamente. Nesse contexto, existem duas situações: na primeira, o sistema possui densidade de carga alta, possuindo, assim, muitos alimentadores de pequena extensão; na segunda, o sistema tem densidade de carga baixa e, portanto, apresenta poucos alimentadores de extensão razoável (LEME et. al, 2013).

2.1.3 Redes de distribuição aéreas rurais

As redes de distribuição rurais, segundo consta na norma técnica 120/2016 (p. 06) da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), são um “Conjunto de linhas elétricas, formado por linha tronco e ramais rurais com os equipamentos e materiais diretamente associados, destinado à distribuição de energia elétrica fora do perímetro urbano”.

Na zona rural, as redes de distribuição levam energia elétrica aos consumidores em pequenas cidades, vilarejos ou comunidades, podendo chegar a dezenas de quilômetros. Porém, por conta de passarem em lugares extremos, ficam muito expostas aos fenômenos da natureza, razão pela qual deve existir proteção em todos os seus trechos (LEME et. al, 2013).

2.1.4 Alimentadores de distribuição de energia elétrica

Sistemas de distribuição de energia elétrica são formados por alimentadores que suprem cargas de locais rurais e urbanos. Esses alimentadores, qualquer que seja o tipo, podem apresentar defeitos. Os urbanos são vulneráveis a roubos de cabo, abalroamento de carro, queda de árvores, entre outros. Os rurais são susceptíveis a galhos de árvores sobre a rede, queda de postes, etc. (MAMEDE FILHO, 2013).

Recomenda-se que, em alimentadores longos, sejam alocados ao menos dois religadores, a fim de eliminar desligamentos nos consumidores urbanos, devido a defeitos na área rural, conforme mencionado a seguir:

Em alimentadores longos, como é o caso de alimentadores que deixam a área urbana e seguem para a área rural, é recomendado alocar pelo menos 2 religadores. Um religador para proteger a área urbana, e outro religador na fronteira entre as áreas urbana e rural. Este segundo equipamento elimina os desligamentos nos consumidores urbanos devido a defeitos na área rural, ou seja, não é apenas para proteger a área rural, mas sim manter a continuidade do serviço de fornecimento de energia no subsistema urbano na ocorrência de faltas nas áreas rurais. (CAMPITELLI, 2007).

2.2 Sistema de proteção

Conforme afirma Mamede e Mamede Filho (2014), um bom sistema de proteção deve conter alguns requisitos básicos, tais como: seletividade; zonas de atuação; velocidade; sensibilidade; confiabilidade e automação.

Ademais, os dispositivos de proteção são essenciais em um sistema elétrico de potência. Veja-se:

Os dispositivos de proteção são equipamentos fundamentais em um sistema elétrico de potência, pois as redes de distribuição aéreas são expostas a falhas que podem ser causadas por descargas atmosféricas, galhos de árvores tocando os condutores, falhas de isolamento, rompimento de condutores, colisões de veículos, instabilidades sistêmicas, entre outros. Estes dispositivos possuem duas funções básicas:

- proteger os equipamentos instalados ao longo do sistema elétrico, normalmente de alto custo. Além disso, a confiabilidade exigida e as consequências no caso de uma interrupção no fornecimento evidencia a importância de se manter o sistema operando o maior tempo possível;
- proteger pessoas, animais, patrimônio público e privado. Diferentemente dos equipamentos, a vida de uma pessoa ou animal possui um valor irreparável, o que também pode ocorrer com um patrimônio público e ou privado (SILVEIRA RAMOS, 2014).

Destaca-se, também, que a desenergização é a principal técnica que se aplica no âmbito das proteções coletivas. Porém, não se pode aplicá-la em todas as atividades, pois é preciso evitar o desligamento dos consumidores de energia (BARROS et. al, 2014).

Assegurar a desconexão de todo sistema elétrico submetido a anormalidades que o faça operar fora dos limites previstos ou de parte dele é a principal função de um sistema de proteção. Ademais, esse sistema tem a função de fornecer aos responsáveis por sua operação, as informações necessárias, facilitando a identificação dos defeitos e a sua consequente recuperação (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

Ainda segundo Mamede e Mamede Filho (2014), os fusíveis e os relés, geralmente, são tomados como base para a projeção da proteção de um sistema de potência. Tais instrumentos são incorporados a um disjuntor, que é a parte mecânica responsável pela desconexão do circuito afetado com a fonte supridora.

Os elementos responsáveis por proteger os sistemas de distribuição são os disjuntores, os relés, os religadores e os fusíveis. Havendo uma falha nas redes de distribuição, eles identificam a corrente de curto circuito e desligam a rede, isolando a região com defeito. Esses equipamentos precisam ser seletivos e coordenados, juntamente dos outros dispositivos de proteção da rede (BERNADON et. al, 2015).

2.3 Tipos de falta

O principal objetivo buscado ao projetar um sistema é prepará-lo de forma adequada, utilizando materiais de qualidade e bem desenhados, bem como planejar de antemão a

execução e instalação da obra com qualidade. No entanto, percebe-se que mesmo dessa forma, o sistema será atingido por más condições, fazendo surgir a falha em diversos pontos do sistema (KINDERMANN, 1997).

Ainda segundo Kindermann (1997), os problemas de isolamento, elétricos, mecânicos, de natureza térmica, de manutenção ou qual outro tipo são os motivos que dão surgimento às falhas.

Leme et. al. (2013, p. 15), destaca a respeito do conceito de faltas. Segundo ele, “Faltas é o termo que se aplica a todo fenômeno acidental que impede o funcionamento de um sistema ou equipamento elétrico. Há dois tipos de faltas, as faltas transitórias e faltas permanentes.”. Ou seja, qualquer fenômeno que prejudique um sistema elétrico é considerado uma falta/falha.

2.3.1 Falta transitória

Do total de faltas nas redes de distribuição, 80% são de origem transitória. As faltas transitórias afetam o circuito temporariamente, ou seja, após a operação de um dos equipamentos de proteção ocorre o religamento do circuito e, assim, a falha é eliminada (CPFL, 2003).

Ainda conforme a CPFL (2003), as causas mais comuns são: descarga atmosférica; abertura de um arco elétrico; materiais com isolamento precária; contato momentâneo entre condutores.

2.3.2 Falta permanente

As faltas permanentes ocorrem com a intervenção do homem para a correção do defeito que interrompeu a energia, antes de religar o circuito. A falta transitória eventualmente poderá transformar-se em uma falha permanente (CPFL, 2003).

Leme et. al. (2013) destaca as principais causas de falhas permanentes, tais como: queda de árvores sobre as redes de distribuição; acidentes automobilísticos envolvendo postes de distribuição e atos de vandalismo.

2.4 Componentes simétricas

Stevenson (1978), ao analisar um experimento de Fortescue, entendeu que um sistema desequilibrado por “n” fasores correlacionados, pode ser dividido em “n” sistemas equilibrados, chamados de componentes simétricos. Ele afirma que esses conjuntos de componentes possuem comprimento igual, assim como os ângulos entre fasores adjacentes.

Ainda segundo Stevenson (1978), de acordo com o teorema de Fortescue, três sistemas equilibrados podem substituir três fasores desequilibrados de um sistema trifásico. Componentes de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero, são os três conjuntos equilibrados de componentes.

Conforme destaca Mamede Filho (2013), o método das componentes simétricas é o mais empregado para desenvolver corretamente os cálculos das tensões, correntes e impedâncias dos sistemas elétricos.

Mamede Filho (2013) ainda destaca a respeito dos três vetores de um sistema trifásico. Veja-se:

Um sistema trifásico qualquer pode ser representado normalmente por três vetores de tensão de módulos e ângulos diferentes. Esse sistema vetorial, no entanto, pode ser decomposto em três conjuntos de vetores, sendo dois de módulos iguais, defasados entre si, de ângulos também iguais, porém girando em sentidos diferentes, e que são denominados, respectivamente, componentes de sequência positiva e componentes de sequência negativa. O terceiro conjunto de vetores, denominado componentes de sequência zero, possui o mesmo módulo, porém os vetores são paralelos e estão deslocados, conseqüentemente, de um mesmo ângulo em relação a um referencial.

Nesse sentido, importante destacar que o sistema trifásico normalmente é simétrico. Contudo, a simetria deixa de existir quando existem cargas desequilibradas; impedâncias desiguais dos enrolamentos dos geradores, motores e transformadores; defeitos monopolares e bipolares, entre outros fatores (MAMEDE FILHO, 2013).

2.4.1 Componentes de sequência positiva

Trata-se de um conjunto formado por três fasores do mesmo módulo, ou seja, balanceados, defasados em 120° , e apresentam uma sequência de fase idêntica à do sistema trifásico original desbalanceado (KINDERMANN, 1997)

2.4.2 Componentes de sequência negativa

Segundo Kindermann (1997), os componentes de sequência negativa são formados por três fasores equilibrados, os quais giram em sequência de fase contrária à do sistema original desbalanceado, e apresentam uma velocidade síncrona contrária a da sequência positiva.

2.4.3 Componentes de sequência zero

Nas palavras de Kindermann (1997, p. 37), “É um conjunto de três fasores iguais, em fase, girando no mesmo sentido da sequência do sistema original desbalanceado, isto é, da sequência positiva”. Ou seja, os componentes de sequência zero apresentam três fasores idênticos, que giram na mesma sequência do sistema original.

2.5 Valores por unidade pu

O sistema pu, ou também chamado, método do valor por unidade, é a definição de uma base de referência para o estudo de determinado componente. As grandezas aludidas nesse sistema, são apresentadas por frações decimais dos valores de base (VIANA FILHO, 2010).

Segundo Milton de Oliveira Pinto (2014), valores em pu exprimem as grandezas elétricas de forma normalizada, a partir de valores já estabelecidos, conforme transcrito a seguir:

É comum, em cálculos de sistema de potência, o uso dos chamados valores em p.u. (por unidade), que é a abreviatura de sistemas por unidade, uma forma de exprimir as grandezas elétricas de modo normalizado, a partir de valores já previamente estabelecidos. Nos sistemas de potências, temos diferentes tensões de operação, devido a presença dos transformadores, assim como diferentes geradores, o que torna todo o cálculo um tanto difícil. Desse modo, às vezes, é conveniente o uso das grandezas em p.u. (ou em percentual). O valor p.u. é dado pela relação entre o valor real da grandeza e o seu valor de base.

Os valores percentuais e por unidade (pu) ou normalizados, correspondem a uma mudança de escala nas grandezas principais (tensão, corrente, potência e impedância). A fim de relacionar o módulo dessas quatro grandezas elétricas em circuitos monofásicos temos duas relações físicas independentes, como demonstrado a seguir (OLIVEIRA et al, 2014).

$$Z = Z \cdot I$$

A união de duas grandezas elétricas torna-se suficiente para determinar a base que será trabalhada durante um estudo. Exemplos delas são: tensão, corrente, impedância (resistência e reatância), potência ativa, reativa e aparente. Tal base pode ser transformada pela seguinte equação (VIANA FILHO, 2010):

$$VALOR_{PU} = \frac{VALOR_{real}}{VALOR_{base}}$$

2.5.1 Valor base das grandezas

Sato e Freitas (2015), falam a respeito dos valores de base:

Os valores de base são grandezas escalares e geralmente convencionam-se:

- S_b - Potência de base, em MVA;
- V_b - Tensão de base, em KV;
- I_b - Corrente de base, em A;
- Z_b - Impedância de base, em Ω ;

Compõem-se as seguintes fórmulas a partir da potência e da tensão como valores de base (SATO; FREITAS, 2015):

$$I_b = \frac{1000S_b}{\sqrt{3}V_b}$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}$$

2.5.1.1 Mudança de base de uma impedância

Para análise do sistema de potência, as impedâncias em pu deverão ser convertidas para uma base comum. Isso porque, a impedância em pu dos equipamentos é determinada a partir de seus valores nominais (dados de placa), que não são iguais aos valores de base do sistema (SATO; FREITAS, 2015).

Assim, Sato e Freitas (2015) concluem que a fórmula para mudança de base é a seguinte:

$$Z_{pu2} = Z_{pu1} \frac{S_{b2}}{S_{b1}} \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)^2$$

2.6 Curto-circuito

No que tange a corrente de curto circuito, Mamede Filho (2013, p. 157) dispõe que “Os condutores das redes aéreas devem suportar as correntes de curto-circuito de forma que a dilatação térmica produzida seja do tipo elástico que não afeta as conexões e nem altere a flecha de segurança em relação ao solo”.

Kagan et. al (2013) dispõe acerca do curto-circuito ao surgir um defeito na rede elétrica. Nota-se:

O estudo de curto-circuito visa, principalmente, à obtenção de correntes e tensões num sistema elétrico de potência, quando da ocorrência de um defeito num de seus pontos. A determinação das sobrecorrentes e sobretensões no sistema fornece subsídios de grande importância para a:

- Proteção contra sobrecorrentes dos componentes do sistema, como, por exemplo, transformadores, linhas etc.
- Especificação dos equipamentos de proteção, tais como disjuntores, relés, fusíveis etc.
- Proteção de pessoas, principalmente em defeitos que envolvem a terra.
- Análise de sobretensões no sistema, quando da ocorrência de curtos-circuitos, principalmente no que se refere a rompimento de isolações dos equipamentos.

Os curtos-circuitos danificam os componentes elétricos por meio dos quais são conduzidos, caso não forem limitados no seu módulo e tempo. São considerados variações extremas da corrente que flui no sistema elétrico. O tempo permitido para a duração dos curtos-circuitos não devem superar o valor de 2 segundos. Os dispositivos de proteção devem ser extremamente velozes e os disjuntores e religadores, precisam apresentar capacidade adequada para operar em condições extremas de corrente. Os disjuntores e os religadores devem possuir duas características básicas de interrupção das correntes de curto-circuito, que são: capacidade de interrupção (corrente máxima que o equipamento de manobra deve ser capaz de interromper em condições definidas por documentos normativos); capacidade de fechamento em curto-circuito (em regra equipamentos de manobra precisam do mesmo valor de capacidade de fechamento em curto- circuito e de capacidade de interrupção) (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

Os curtos-circuitos são as perturbações mais comuns e severas que ocorrem em devido a ruptura do isolamento entre as fases ou entre fase e terra. A grandeza da corrente de curto-circuito depende de fatores como o tipo de curto-circuito, o tipo de aterramento do neutro dos equipamentos, a capacidade do sistema de geração, entre outros (SATO; FREITAS, 2015).

Segundo alega Kindermann (1997, p. 137), “Apesar do defeito ser indesejável, o curto-circuito sempre ocorre em pontos aleatórios da rede elétrica. Se os curtos-circuitos não forem rapidamente eliminados, os danos aos equipamentos que integram a rede elétrica poderão ser elevados.”.

Em complementação, Mamede e Mamede Filho (2014) destacam que as correntes de curto-circuito devem ser eliminadas do sistema elétrico, a fim de evitar danos internos aos transformadores, especialmente nos enrolamentos, os quais podem ficar seriamente danificados quando correntes de defeito elevadas circulam por eles. Isso porque, os primeiros ciclos da corrente de curto-circuito provocam forças mecânicas intensas e os relés atuam com temporização permitida, tendo em vista o esquema de coordenação da proteção.

Conforme Sato e Freitas (2015), a Tabela 1 demonstra as estatísticas causadas por curtos-circuitos relativos à sua natureza.

Tabela 1 - Frequências típicas de ocorrências de curtos-circuitos

Curto-circuito	Frequência (%)
Trifásico	5,0
Bifásico	15,0
Bifásico-terra	10,0
Fase-terra	70,0

Fonte: SATO; FREITAS, 2015

2.6.1 Correntes simétricas e assimétricas de curto-circuito

A corrente de curto-circuito pode apresentar assimetria no momento em que ocorre o curto-circuito. Nesse instante e quando a tensão estiver passando por zero, ocorre o pico máximo da corrente assimétrica. Dessa forma, decai extraordinariamente a componente contínua do curto-circuito que é responsável por essa assimetria. A função da relação X/R no ponto de curto-circuito é a constante de tempo da componente. Assim, a assimetria máxima é definida como o valor máximo da componente contínua da corrente de curto-circuito no instante $t=0$ (SATO; FREITAS, 2015).

Conforme também destacam Sato e Freitas (2015), algumas observações devem ser seguidas para a elaboração de um cálculo de curto-circuito. Nota-se:

As seguintes observações devem ser levadas em consideração nos cálculos das correntes de curtos-circuitos:

Os valores das correntes de curtos-circuitos trifásico e bifásico serão calculados como valores máximos, ou seja, considerando-se a impedância de contato nula.

As correntes de curto-circuito fase-terra deverão ser calculadas com impedância de contato igual à zero (valor máximo), usada para dimensionamento de equipamentos, e com impedância de contato de 40,0 ohms, que será usada para verificação de coordenação e seletividade entre dispositivos.

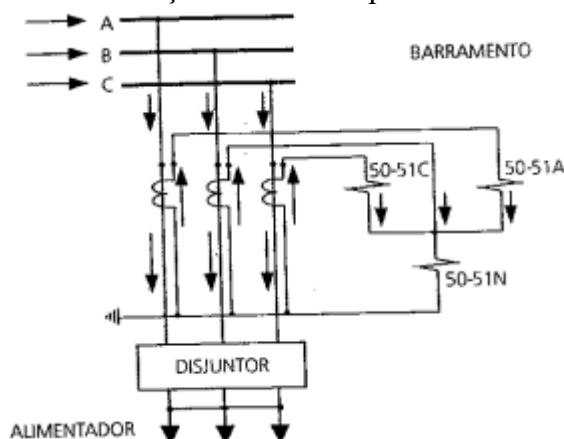
Devem ser calculadas as correntes simétrica e assimétrica com a relação X/R no ponto em que está sendo simulado o curto-circuito. Desconhecendo-se a relação X/R pode usar 1,35 como fator de assimetria para curto-circuito a aproximadamente 3,0 km da subestação.

A corrente assimétrica de curto-circuito é composta da corrente simétrica senoidal e da componente contínua, enquanto que a corrente simétrica é composta pela corrente alternada, que é aquela obtida pelo cálculo das correntes de curto-circuito por meio das componentes simétricas (KINDERMANN, 1997).

2.6.1.1 Curto-circuito trifásico

Um exemplo de curto-circuito trifásico é aquele que surge quando três condutores encostam um no outro ao mesmo tempo, conforme Figura 1, que demonstra a circulação da corrente em um caso de defeito trifásico. Assim, ocorrendo o curto-circuito entre as três fases, os relés de sobrecorrente operam 50-51C (Relé de sobrecorrente instantâneo de fase; Relé de sobrecorrente com controle de torque) e 50-51A (Relé de sobrecorrente instantâneo de fase; Relé de sobrecorrente temporizado), não ocorrendo, contudo, a operação do relé 50-51N (Relé de sobrecorrente instantâneo; Sobrecorrente temporizado de neutro) (ARAÚJO et al, 2005).

Figura 1 - Circulação de corrente para um defeito trifásico

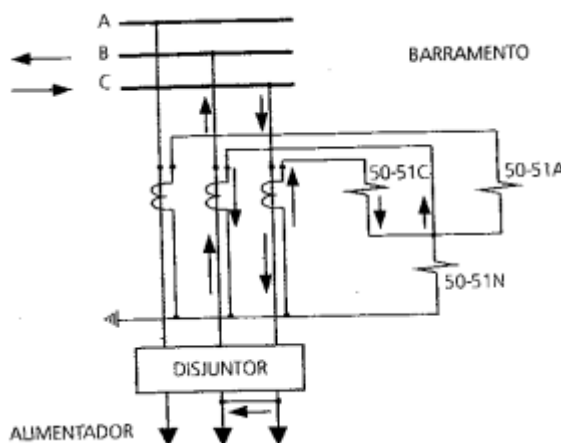


Fonte: (ARAÚJO et. al, 2005).

2.6.1.2 Curto-circuito bifásico

Um curto-circuito bifásico ocorre, por exemplo, quando o condutor da fase C encosta no condutor da fase B, de acordo com a Figura 2, que demonstra a circulação da corrente em um caso de defeito bifásico. Dessa forma, o relé de sobrecorrente opera 50-51C (Relé de sobrecorrente instantâneo de fase; Relé de sobrecorrente com controle de torque). No entanto, destaca-se que se o curto-circuito fosse entre as fases A e C, os relés operariam 5-51C (dispositivo de interrupção; Relé de sobrecorrente com controle de torque) e 50-51A (Relé de sobrecorrente instantâneo de fase; Relé de sobrecorrente temporizado). (ARAÚJO et. al, 2005).

Figura 2 - Circulação de corrente para um defeito bifásico

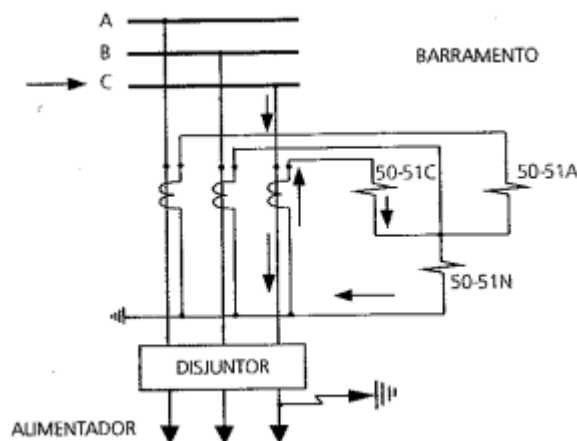


Fonte: (ARAÚJO et. al, 2005).

2.6.1.3 Curto-circuito monofásico ou fase-terra

Cita-se como exemplo, nesse caso, um curto-circuito ocorrido quando um galho de árvore encosta no condutor da fase C, conforme Figura 3, que demonstra a circulação da corrente em um caso de defeito monofásico. Assim, ocorrendo o curto-circuito entre a fase C e a terra, somente operará o relé neutro, 50-51N (Relé de sobrecorrente instantâneo; Sobrecorrente temporizado de neutro). Ademais, também é sensibilizado o relé da fase C, no entanto o relé neutro atuará com mais rapidez para defeito fase-terra (ARAÚJO et. al, 2005).

Figura 3 - Circulação de corrente para um defeito monofásico



Fonte: (ARAÚJO et. al, 2005).

2.7 Equipamentos de proteção

Equipamentos de proteção e de manobra são como chaves que interligam dois pontos de rede, com a indicação de seu estado, dos seus ajustes e limites técnicos (BERNADON et. al, 2015).

2.7.1 Chave Faca

As chaves faca são utilizadas em operações de manobra. Quando a rede é energizada essas chaves, para serem operadas, precisam de um dispositivo auxiliar de extinção de arco. Elas são instaladas entre circuitos diferentes, a fim de conseguir alterações de configuração da rede e, assim, minimizar tempos de desligamentos no caso de surgirem graves falhas, as quais requerem longos tempos para que os problemas sejam reparados. Dependendo do ponto de instalação, podem ser do tipo NA (normalmente aberta), ou NF (normalmente fechada) (COELHO, 2010).

2.7.2 Chave Fusível

Chave fusível é um equipamento que protege sobrecorrentes de circuitos primários. Essa chave é normalmente utilizada em redes de distribuição aéreas, urbanas e rurais, bem como em pequenas subestações de concessionária e de consumidor. Possui um elemento fusível, o qual responde pelas características básicas de sua operação (MAMEDE FILHO, 2013).

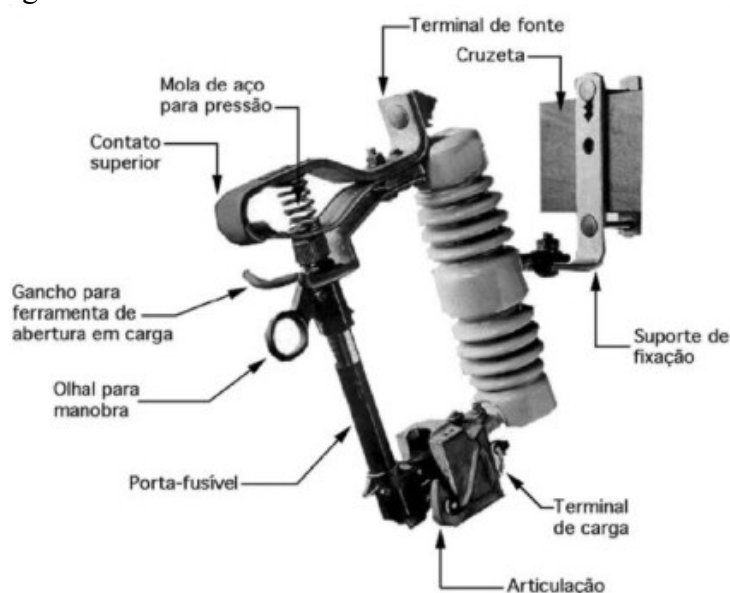
Em redes primárias de distribuição de energia elétrica, a chave fusível é muito utilizada como um equipamento de proteção contra sobrecorrentes. Para operá-la, utiliza-se a fusão do elo fusível quando é percorrido, dentro de um determinado tempo, por uma corrente elétrica acima da nominal, de acordo com sua característica de tempo em função da corrente. (PARADELO JUNIOR, 2006).

A chave fusível deve perceber, no sistema que está protegendo, uma condição de sobrecorrente, que deve ser interrompida, quando o fusível esquentar. Assim que completar a interrupção, o fusível que foi rompido deve suportar a tensão do sistema aplicado aos terminais, fazendo com que os danos que foram causados pelas sobrecorrentes sejam bem pequenos. Quando a falta é grande, isso torna-se muito importante e, assim, deve-se utilizar um fusível limitador de corrente (VIANA FILHO, 2010).

A chave fusível possui baixo custo, razão pela qual é muito empregada em derivações de ramais, e devem ter capacidade de interrupção maior que a máxima corrente de curto-circuito do ponto de instalação. Para a RGE existem duas capacidades de interrupção, pois existem altas correntes de curto-circuito disponíveis no seu sistema elétrico. Essas chaves fusíveis podem transportar até 300 A, quando usadas com lâminas desligadoras. Já quando usadas com elos fusíveis, a capacidade de condução é a nominal do elo fusível (CPFL, 2016).

A Figura 4 apresenta uma chave fusível, detalhando os componentes da sua estrutura.

Figura 4 - Chave Fusível



Fonte: MAMEDE FILHO, 2013.

A GED 926 da CPFL (2017), cita as principais características de uma chave fusível, tais como:

- A chave deve ter base tipo C, fornecida com porta fusível;
- Deverá indicar sua operação por deslocamento do porta fusível para a posição do circuito aberto, bem como permitir a instalação e a remoção do porta fusível e de lâmina desligadora com uma vara de manobras;
- A fim de possibilitar a fixação de dispositivo de abertura em carga, a base deverá possuir dois ganchos incorporados ao terminal superior, os quais deverão ser de material não ferroso, aço galvanizado a quente ou aço inoxidável;
- O isolador, de porcelana ou de material polimérico, deverá ter superfície lisa, livre de incrustações de materiais estranhos, bolhas, rachaduras, superfície desgastada ou qualquer outro tipo de imperfeição;
- Devem operar como porta fusíveis das mesmas características nominais de todos os fornecedores.

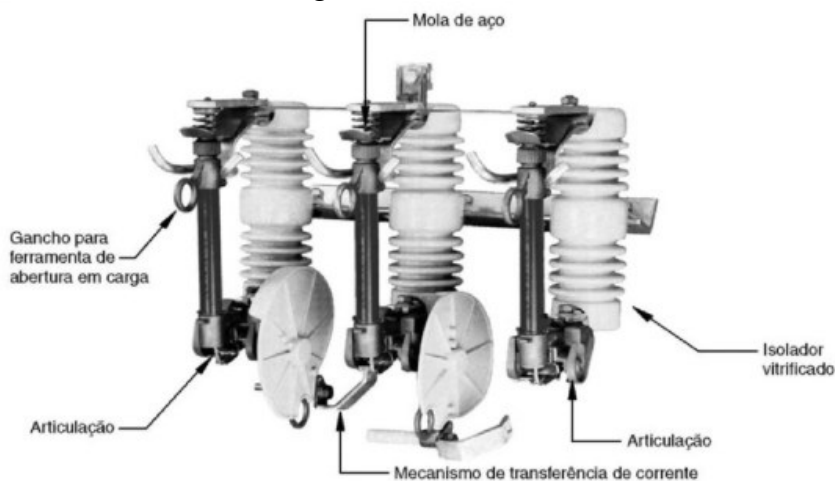
2.7.2.1 Chave fusível religadora

Verifica-se que a chave fusível religadora é, na verdade, um conjunto formado por duas ou três chaves fusíveis. Veja-se:

A chave fusível religadora é uma montagem de duas ou três chaves fusíveis em um único conjunto, sendo que normalmente apenas uma chave do conjunto conduz a corrente do circuito. Quando ocorre a queima do elo fusível dessa chave, a sua queda provoca o acionamento de um mecanismo que transfere a corrente para outra chave do conjunto, podendo essa sequência acontecer uma segunda vez. Caso o elo fusível da última chave do conjunto também queime, haverá interrupção do circuito, sendo necessária substituir-se os elos fusíveis e rearmar os dispositivos de transferência, com a vara de manobra (CPFL, 2016).

A Figura 5 demonstra uma chave fusível religadora, detalhando os componentes de sua estrutura.

Figura 5 - Chave fusível religadora



Fonte: MAMEDE FILHO, 2013.

Afirmando a norma supramencionada, Coelho (2010) também refere que a chave fusível religadora ou repetidora é um conjunto de três chaves fusíveis. Quando atua a chave principal, que é energizada em série com a rede, é acionado um dispositivo mecânico, a fim de colocar em operação uma segunda chave, a qual rearma uma terceira chave. Este dispositivo é uma alternativa barata para eliminar as faltas temporárias em ramais afastados das subestações, inclusive por possuir baixo nível de curto-circuito.

Conforme a GED 2912 da CPFL (2016), a chave fusível religadora é indicada especialmente para redes rurais, com baixa corrente de curto-circuito, pois permite, com o religamento da chave, que os primeiros defeitos transitórios sejam eliminados.

2.7.3 Elo Fusível

Um elo fusível trata-se de um elemento no qual uma parte sensível é inserida a elevadas correntes, sendo posteriormente fundida e rompida em um intervalo de tempo contrariamente proporcional à grandeza dessa corrente (MAMEDE FILHO, 2013).

Para a construção de um elo fusível é preciso utilizar um material que não se altere química e fisicamente, de forma permanente, com o decorrer do tempo de utilização ou com a passagem da corrente elétrica. Para isso, o material apropriado é uma liga de estanho com ponto de fusão de aproximadamente 230°C (MAMEDE FILHO, 2013).

Mamede Filho (2013) destaca que existem dois tipos de elos fusíveis, cada um com uma aplicação específica:

- Elo fusível de botão

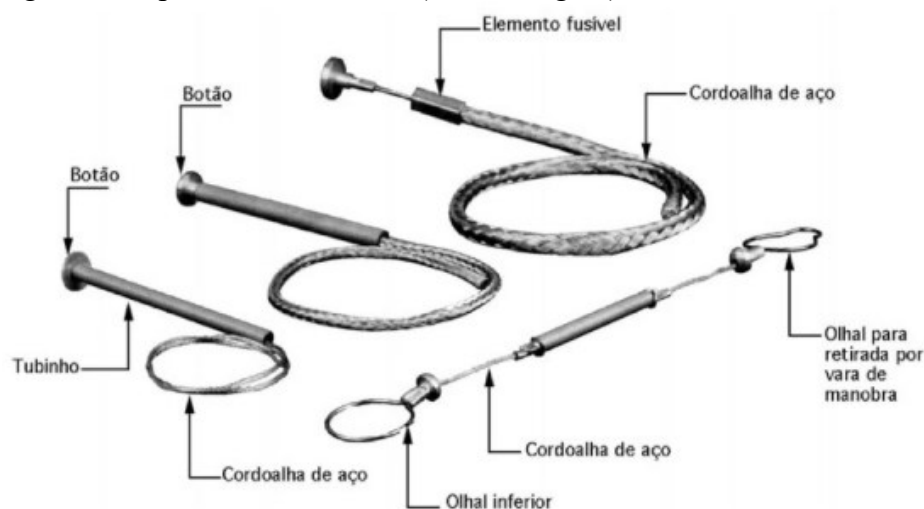
Possuem um botão metálico na extremidade superior, o qual deve ser preso na parte superior do porta-fusível.

- Elo fusível de argola

Possuem duas argolas nas extremidades e são geralmente utilizados na proteção de unidades transformadoras pequenas, especialmente aquelas de sistemas MRT (monofilar com retorno por terra).

A Figura 6 apresenta dois tipos de elos fusíveis, o botão e a argola, especificando os componentes da sua estrutura.

Figura 6 - Tipos de elos fusíveis (botão e argola)



Fonte: MAMEDE FILHO, 2013.

Ademais, segundo Mamede e Mamede filho (2014), os elos fusíveis são fabricados e utilizados devido as características tempo *versus* corrente, permitindo a codificação nas classificações a seguir explanadas.

Tipo H: chamados de fusíveis de alto surto, os quais são utilizados para proteger os transformadores de distribuição. Possuem tempo lento de atuação, para que os fusíveis não operem durante a energização do transformador devido à corrente de surto ou corrente de *inrush*. Sua rapidez varia entre 11,4 para elos fusíveis de corrente de 0,5 A, a 36,4 para fusíveis de 5 A e são fabricados com as seguintes correntes nominais: 0,5A - 1A - 2A - 3A - 5A.

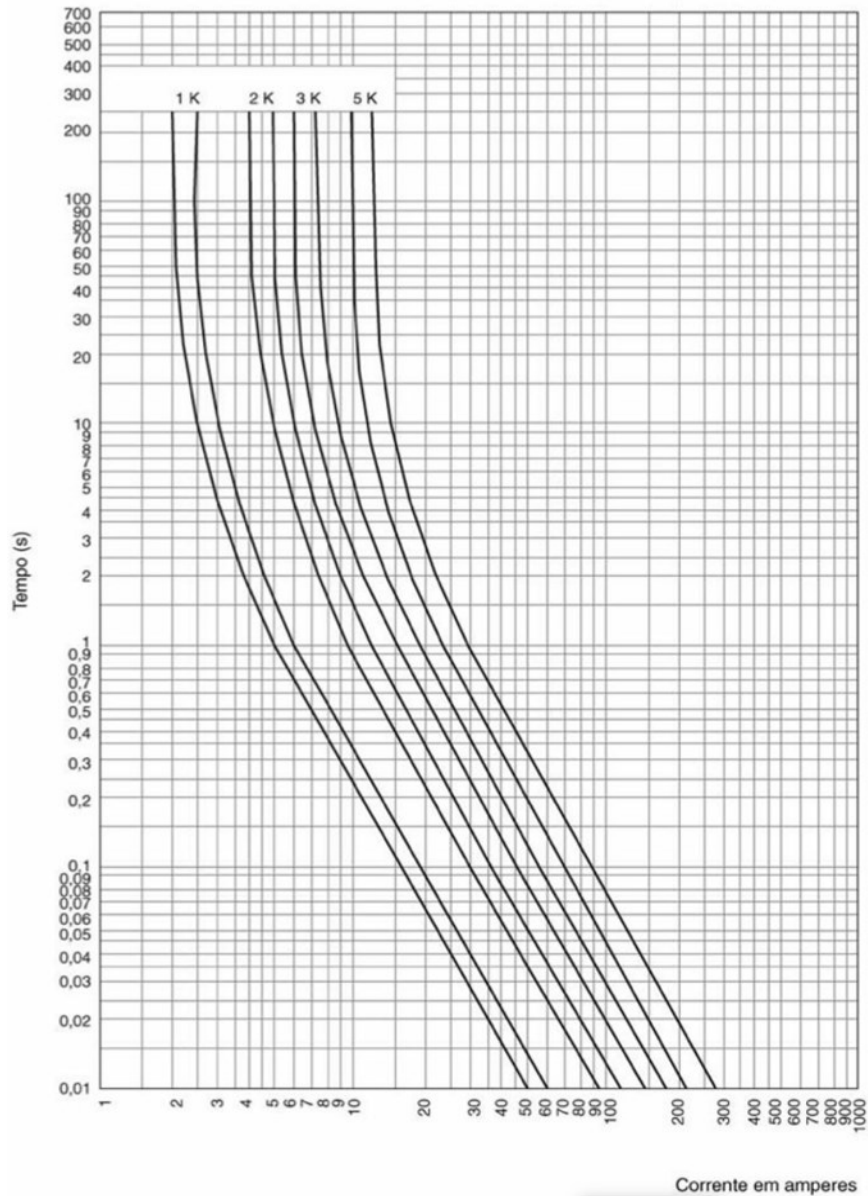
Tipo T: com um tempo de atuação lento, possuem relação de rapidez variando entre 10 A, para elos fusíveis de corrente nominal de 6 A, 13 A, para elos fusíveis de corrente nominal de 200 A. Porém, quanto aos valores de corrente nominal, frisa-se que os elos fusíveis K e T apresentam os mesmos. Ademais, os elos fusíveis do tipo T são destinados à proteção de alimentadores de distribuição e seus correspondentes ramais.

Tipo K: geralmente são usados para proteger ramais de alimentadores de distribuição ou instalados ao longo da trajetória final desses alimentadores, pois possuem rápido tempo de atuação. Apresentam relação de rapidez variando entre 6A, para elos fusíveis de corrente nominal de 6 A, e 8,1 A, para elos fusíveis de corrente nominal de 200 A. Agrupam-se em elos fusíveis preferenciais e elos fusíveis não preferenciais, classificação dada para indicar que somente existe coordenação entre os elos fusíveis listados dentro de um mesmo grupo, pois os elos fusíveis de diferentes grupos não são seletivos. Os preferenciais são fabricados com as correntes nominais: 6 - 10 - 15 - 25 - 40 - 65 - 100 - 140 - 200 A, enquanto que os

não preferenciais são fabricados com as correntes nominais: 8 – 12 – 20 – 30 – 50 – 80 A (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

A Figura 7 demonstra a curva de atuação dos elos fusíveis do tipo K.

Figura 7 - Curva de atuação tempo versus corrente dos elos fusíveis tipo K



Fonte: MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014.

Ainda nas palavras de Mamede e Mamede filho (2014), é preciso seguir critérios básicos para a aplicação dos elos fusíveis nos sistemas de distribuição, tais como:

- prever o crescimento da carga no dimensionamento do elo fusível para um período de pelo menos 5 anos;

- prever as cargas que podem ser eventualmente transferidas por meio de manobras na rede de distribuição, no dimensionamento do elo fusível, a fim de permitir a manutenção corretiva e preventiva;
- a corrente nominal do elo fusível para proteger um ramal precisa ser igual ou superior a 150% da corrente máxima de carga prevista no projeto no ponto de instalação da chave fusível, conforme a seguinte equação:

$$I_{nef} \geq 1,5 \times I_{m\acute{a}x}$$

Onde:

I_{nef} - corrente nominal do elo fusível, em A.

$I_{m\acute{a}x}$ - corrente máxima do alimentador, em A.

- a corrente nominal da chave fusível precisa ser idêntica a pelo menos 150% da corrente nominal do elo fusível, o qual será utilizado na proteção do ramal de distribuição;
- as correntes de curto-circuito bifásicas, trifásicas e fase-terra precisam ser determinadas em todos os lugares que estão instaladas as chaves fusíveis;
- determinar a corrente de carga máxima em cada trecho da rede de distribuição;
- a corrente nominal do elo fusível deve ser igual ou inferior a 25% da corrente de curto-circuito fase-terra mínima que ocorrer no fim do trecho para uma resistência de aterramento de 40 W, conforme a seguinte equação:

$$I_{nef} \leq 0,25 \times I_{ft}$$

Onde:

I_{ft} – corrente de curto-circuito fase-terra, em A.

2.7.4 Religador

Destaca-se que os “Religadores automáticos são equipamentos de interrupção da corrente elétrica dotados de uma determinada capacidade de repetição em operações de abertura e fechamento de um circuito, durante a ocorrência de um defeito” (MAMEDE FILHO, 2013, p. 589).

Mamede Filho (2013) ainda refere que nos circuitos de distribuição de redes aéreas de concessionárias de energia elétrica os religadores possuiu uma grande aplicação, pois permitem a eliminação de defeitos transitórios sem precisar de manutenção de pessoal. Contudo, deve-se observar que em instalações industriais ou comerciais, onde os defeitos são quase sempre permanentes, esses equipamentos não devem ser utilizados.

Insta consignar também sobre a aplicação dos religadores na zona rural. Veja-se:

Na zona rural, os religadores são empregados mais pela sua função de proteção, isolando a rede urbana dos defeitos que ocorrem na zona rural, e evitando a queima de elos fusíveis durante os defeitos temporários. Na zona urbana os religadores são usados pela sua capacidade de telecomando, permitindo que manobras para transferências de carga sejam feitas rapidamente. Entretanto, em ambos os casos, as duas funções podem ser usadas (CPFL, 2016).

Na área rural, deve-se usar 4 desligamentos, de preferência uma sequência de operações com duas operações rápidas e duas operações temporizadas, a fim de diminuir, durante defeitos transitórios, queimas de elos fusíveis. Verifica-se que todas as operações poderão ser temporizadas, a critério do projetista, em locais onde as operações rápidas possam causar problemas com consumidores (CPFL, 2016).

O religador evita a queima de elos fusíveis, pois interrompe as faltas transitórias. Além disso, quando bem coordenado com elos fusíveis, secciona apenas o trecho sob defeito. Pode-se afirmar, assim, que o religador é um dispositivo interruptor automático de defeitos. Ele abre e fecha seus contatos várias vezes em caso de surgirem faltas no circuito que ele protege. Destaca-se que o religador pode ser monofásico ou trifásico (SCHIEFELBEIN; WERNER; RODRIGUES, 2014).

Santos (2012) refere que os religadores são considerados equipamentos capazes de realizar de forma automática operações de energização e interrupção de circuitos. Podem ser programados para realizar 1, 2, 3 ou 4 aberturas, de acordo com o ciclo de operação. Exceto a última, as demais aberturas são seguidas de religamento. Importante salientar que o espaço de tempo entre uma abertura e um religamento é chamado tempo de religamento.

Ainda nas palavras de Santos (2012), o religador iniciará seu ciclo de operação ao ocorrer uma falta em uma zona de proteção. Nota-se:

Quando ocorrer uma falta em sua zona de proteção o religador será sensibilizado pelas sobrecorrentes geradas pela falta e iniciará seu ciclo de operação. Se a falta for permanente, o ciclo de operação será completado e o religador bloqueará interrompendo o circuito de forma definitiva, só podendo ser religado manualmente (ou por telecontrole). Caso a falta seja transitória o religador não completará o ciclo

de operação e manterá o circuito energizado. Após o tempo de rearme, o religador retorna as condições iniciais ficando pronto para iniciar um novo ciclo de operação. O tempo de rearme depende do número de aberturas efetuadas e do modelo do equipamento.

Segundo Mamede Filho (2013), para quaisquer ciclo de operação, os religadores permitem ajustes com quatro operações, no máximo, tais como: uma operação rápida e três retardadas; duas rápidas e duas retardadas; três rápidas e uma retardada e; quatro rápidas.

Recomendam-se algumas sequências de operações. Não existindo seccionador em série com fusível no lado da carga, recomenda-se duas sequencias rápidas e duas temporizadas; caso exista, recomenda-se uma operação rápida e três operações temporizadas. Em alguns casos, a sequência de operações para faltas entre fases poderá ser diferente da sequência de operações para faltas aterra, de acordo com a necessidade de coordenação entre proteções. Em outros casos, utiliza-se um número total de operações menor que quatro (SCHIEFELBEIN; WERNER; RODRIGUES, 2014).

2.7.4.1 Classificação dos Religadores

Verifica-se que os religadores podem ser classificados quanto ao tipo de controle: hidráulico ou eletrônico; quanto ao meio de extinção: religadores com interrupção a óleo, religadores com interrupção a vácuo, religadores com interrupção a SF₆ (hexafluoreto de enxofre); quanto ao número de fases: monofásico ou trifásico (Trifásicos com Operação Monofásica e Bloqueio Trifásico; Trifásicos com Operação Trifásica e Bloqueio Trifásico) (SCHIEFELBEIN; WERNER; RODRIGUES, 2014).

A seguir, apresenta-se uma breve explanação a respeito da classificação dos religadores quanto as fases.

Os religadores monofásicos protegem as redes de distribuição monofásicas e podem ser utilizados em cada fase das redes trifásicas que alimentam cargas monofásicas,. No segundo caso, quando operar uma unidade, devido a defeito fase e terra permanente, os outros consumidores ligados às outras duas fases remanescentes não são afetados, pois a unidade é bloqueada no final do ciclo de religação (MAMEDE FILHO, 2013).

Os religadores trifásicos protegem as redes aéreas de distribuição, nas quais é preciso o realizar a separação tripolar simultânea, a fim de evitar que cargas trifásicas ligadas ao alimentador funcionem com apenas duas fases. Existe também a possibilidade de empregar bancos de religadores monofásicos, para operarem em redes aéreas de distribuição trifásicas.

Ali, mesmo que exista defeito entre uma das fases e terra, realiza-se o seccionamento simultâneo nas três unidades que compõem o banco (MAMEDE FILHO, 2013).

Ainda sobre a classificação dos religadores, destacam-se os religadores trifásicos com operação monofásica e bloqueio trifásico, os quais são formados por três religadores monofásicos em um mesmo tanque, conforme trecho que segue:

Trifásico com operação monofásica e bloqueio trifásico - São constituídos de três religadores monofásicos, montados num mesmo tanque, com os mecanismos interligados apenas para ser processado o bloqueio trifásico. Cada fase opera independentemente em relação às correntes de defeito. Se qualquer das fases operar o número pré-ajustado para bloqueio, as duas outras fases são abertas e bloqueadas através do mecanismo que as interliga (SCHIEFELBEIN; WERNER; RODRIGUES, 2014).

Ademais, com relação ao religador trifásico com operação trifásica e bloqueio trifásico, destaca-se que é constituído por apenas um religador, que opera e bloqueia trifasicamente, não importando o tipo de falha que venha a ocorrer, ou seja, se a falha afetar apenas uma das fases, todos os contatos vão realizar a operação de abertura e religamento (SCHIEFELBEIN; WERNER; RODRIGUES, 2014).

2.7.5 Seccionador

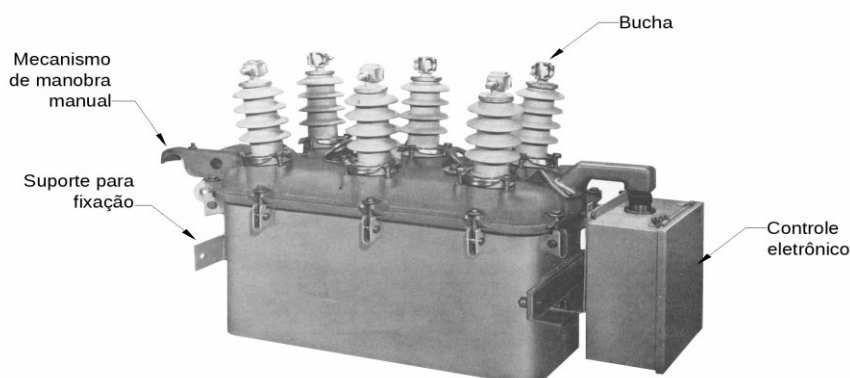
Seccionadores automáticos são equipamentos de proteção usados em redes aéreas de distribuição. Na ocorrência de um defeito a jusante da instalação de um alimentador em determinado trecho, onde sua interrupção é efetuada por equipamento de retaguarda, os seccionadores automáticos possuem o objetivo de separar de forma definitiva esse trecho do alimentador (MAMEDE FILHO, 2013).

Em que pese seja considerado um equipamento de proteção automático, o seccionador é instalado sempre depois de outro equipamento de proteção automático (religador ou disjuntor) e dentro da zona de proteção do último equipamento (CPFL, 2016).

Insta consignar que o seccionador não precisa possuir capacidade de interrupção compatível com o nível de curto-circuito do ponto de sua instalação. Isso porque, sua função é seccionar uma parte de um alimentador que possui uma falta permanente, enquanto outro um equipamento de retaguarda interrompe a corrente resultante do referido defeito (MAMEDE FILHO, 2013).

A Figura 8 apresenta um modelo de seccionador de controle eletrônico.

Figura 8 - Modelo de seccionador de controle eletrônico



Fonte: MAMEDE FILHO, 2013.

Um seccionador pode substituir as chaves fusíveis indicadores unipolares, porém, precisa apresentar motivação econômica, tendo por base o atendimento de áreas com alta densidade de carga, bem como áreas industriais ou cargas especiais. Verifica-se que isso apresenta algumas vantagens, como por exemplo: coordenação total com os religadores instalados a montante; eliminação da operação monopolar, que é uma característica das chaves fusíveis para curtos-circuitos fase e terra; redução dos equívocos de coordenação entre os religadores e os elos fusíveis; desnecessidade de substituição dos elos fusíveis gerando redução de custo (MAMEDE FILHO, 2013).

Na GED 2912 da CPFL (2016) é explanado a respeito do funcionamento do seccionalizador, conforme trecho a seguir:

O funcionamento do seccionalizador pode ser resumido no seguinte:

- a) Quando circula pelo seccionalizador uma corrente de curto-circuito, o seccionalizador é sensibilizado e se prepara para contar.
- b) Esta corrente também sensibilizará o equipamento de retaguarda, que abrirá o circuito. O seccionalizador notará a abertura do equipamento de retaguarda devido à queda da corrente para valores abaixo do seu valor de disparo e contará a operação do equipamento
- c) Após o tempo determinado, o equipamento de retaguarda fechará o circuito. Se o defeito persistir, o processo se repetirá até que o seccionalizador acumule a quantidade de contagem ajustada, quando então, durante o tempo em que o equipamento de retaguarda estiver aberto, o seccionalizador abrirá os seus contatos principais.

Mamede Filho (2013) argumenta que existe uma classificação dos seccionadores quanto ao número de fase, os quais são os mais utilizados pelas concessionárias brasileiras: os monofásicos, que são equipamentos monopolares que seccionam automaticamente as redes

aéreas de distribuição monofásicas e, os trifásicos, que são equipamentos tripolares que seccionam automaticamente as redes aéreas de distribuição trifásicas.

2.7.6 Disjuntor

Um disjuntor é um dispositivo de manobra mecânico que estabelece, conduz durante um tempo específico e interrompe correntes em condições anormais do circuito, como por exemplo as de curto-circuito. Ademais, também estabelece, conduz e interrompe correntes em condições nominais do circuito (LEDESMA, 2012).

Importante referir que “A função principal de um disjuntor é interromper as correntes de defeito de um determinado circuito durante o menor espaço de tempo possível” (MAMEDE FILHO, 2013, p. 325). Ou seja, um disjuntor deve sempre buscar interromper correntes de defeitos dos circuitos de forma rápida.

Os alimentadores de distribuição precisam ser protegidos na saída da subestação (na origem), através de disjuntores de média tensão, associada a relés de sobrecorrente (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

Os disjuntores sempre devem ser instalados acompanhados da aplicação dos relés respectivos, que são os elementos responsáveis pela detecção das correntes, tensões, potência, etc. do circuito. Após serem analisadas por sensores ajustados previamente, enviam ou não a ordem de comando para a sua abertura. Destaca-se que um disjuntor instalado sem os correspondentes relés, não protege o sistema, apenas se torna uma ótima chave de manobra (MAMEDE FILHO, 2013).

Mamede e Mamede Filho (2014) apresentam alguns requisitos que devem ser seguidos para que o disjuntos atenda aos critérios de proteção, conforme destaca-se a seguir:

A tensão nominal do disjuntor deve ser igual ou superior à tensão nominal do sistema. Quando a tensão do disjuntor for superior, deve-se considerar a capacidade de interrupção do disjuntor em função do valor da tensão nominal do sistema.

A capacidade nominal do disjuntor deve ser superior à máxima corrente que possa fluir pelo disjuntor, obtida a partir do planejamento de longo prazo.

A capacidade de interrupção do disjuntor deve ser igual ou superior à corrente de curto-circuito trifásico ou fase-terra, a que for maior, no ponto de instalação do disjuntor, ou seja, o barramento da subestação.

O nível de isolamento do disjuntor deve ser compatível com o nível de isolamento do sistema (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

Ledesma (2012) destaca os principais tipos de disjuntores, conforme transcrito a seguir:

1. Disjuntor a sopro magnético.
 2. Disjuntor a óleo.
 - a. Disjuntores a grande volume de óleo (GVO).
 - b. Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO).
 3. Disjuntores a vácuo.
 4. Disjuntores a ar comprimido.
 5. Disjuntores a SF₆.
 - a. Disjuntores a SF₆ de dupla pressão.
 - b. Disjuntores a SF₆ de pressão única
- (LEDESMA, 2012)

2.7.7 Relé de Proteção

Para a proteção dos sistemas elétricos são utilizados dois dispositivos básicos, que são os fusíveis e os relés. Pois bem, os fusíveis operam pela fusão do seu elemento metálico construído com características específicas de tempo versus corrente, enquanto que os relés constituem uma gama ampla de dispositivos, os quais protegem os sistemas elétricos de diversas maneiras, como sobrecarga, curto-circuito, sobretensão, subtensão, entre outros (MAMEDE e MAMEDE FILHO, 2014).

Ademais, os relés de proteção tem como objetivo gerenciar e monitorar as grandezas elétricas em um circuito determinado, com a função principal de enviar um sinal de disparo, por meio de um contato seco, para uma bobina de abertura ou de mínima tensão dos disjuntores associados (PARADELO JUNIOR, 2006).

2.7.7.1 Classificação dos Relés

Alguns elementos são essenciais para classificar os relés, conforme será analisado a seguir:

a) Quanto ao tipo de acionamento:

- Ação direta: são instalados no circuito primário protegido, diretamente (PARADELO JUNIOR, 2006);

- Ação indireta: recebem sinais de tensão de transformadores de potência (TPs) e sinais de corrente por meio de transformadores de corrente. Os relés existentes no mercado hoje em dia são de ação indireta (PARADELO JUNIOR, 2006).

b) Quanto ao tipo de temporização:

- Instantâneos: formados por uma armadura articulada, possuem uma unidade de bandeirola. Atuam quando a tensão fica acima ou abaixo dos valores predeterminados na regulagem (MAMEDE e MAMEDE FILHO, 2014).

- Temporizados: são acionados após um determinado tempo, quando uma grandeza monitorada superar o valor ajustado no equipamento (PARADELO JUNIOR, 2006).

c) Quanto à função de proteção:

Segundo Paradelo Junior (2006), as proteções mais comumente aplicadas e associadas a redes de distribuição primária são as seguintes:

- 50 – Sobrecorrente instantânea de fase;
 - 51 – Sobrecorrente temporizada de fase;
 - 50N – Sobrecorrente instantânea de neutro (terra);
 - 51N – Sobrecorrente temporizada de neutro (terra);
 - 50GS – Sobrecorrente instantânea de terra de alta sensibilidade;
 - 51GS – Sobrecorrente temporizada de terra de alta sensibilidade;
 - 79 – Religamento automático;
 - 86 – Relé de Bloqueio;
 - 50BF – Falha de disjuntor;
 - 74TC – Supervisão do circuito de abertura do disjuntor.
- (PARADELO JUNIOR, 2006)

Quanto à tecnologia:

- Eletromecânicos: equipamentos dotados de disco de indução, molas, bobinas, contatos fixos e móveis que lhes atribuem grande força. Equiparam-se a peças de relojoaria, devido, especialmente, a sua forma de operação. Os parâmetros elétricos possuem fácil manutenção e ajuste (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

- Eletrônicos: ou relés estáticos. Possuem reduzidas dimensões, ao contrário dos relés eletromecânicos de indução. Dessa forma, apresentam painéis de comando e de controle com menores dimensões. São compostos de circuitos integrados dedicados a cada função desempenhada. São ajustados por meio de diais fixados na parte frontal do relé. Destaca-se que cada dial ajusta uma determinada função de proteção (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

- Digitais: são tecnologicamente mais modernos e avançados. Apresentam várias funções de medição, controle e proteção, em uma única unidade. Observa-se que o relé digital é formado por duas partes, hardware e software (PARADELO JUNIOR, 2006).

2.8 Filosofia de Proteção

Destacam-se aqui alguns requisitos essenciais para que um sistema de proteção atue com eficácia: seletividade, velocidade, coordenação, automação, sensibilidade e confiabilidade (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

Insta consignar que em sistemas de distribuição é preciso estudar, analisar e avaliar a coordenação e seletividade da sua proteção, a fim de evitar interrupções do fornecimento de energia e, assim, melhorar a qualidade do seu fornecimento. O sistema de proteção deve ser capaz de isolar e remover a parte defeituosa no menor tempo possível, a fim de garantir a qualidade do serviço. Por esse motivo o sistema de proteção deve ser ajustado de forma coordenada e seletiva (LEDESMA, 2012).

A GED 2912 (2016) nos apresenta alguns conceitos que podem auxiliar para o entendimento da sequência desta seção. Veja-se:

Coordenação - Ato ou efeito de dispor dois ou mais equipamentos de proteção em série segundo certa ordem, de forma a atuarem em uma sequência de operação pré-estabelecida. O objetivo da coordenação é evitar que faltas transitórias causem a operação de dispositivos de proteção que não tenham religamentos automáticos e que, no caso de defeitos permanentes, a menor quantidade possível da rede fique desligada.

Seletividade - Capacidade do equipamento de proteção mais próximo da falta de antecipar, sempre, a atuação do equipamento de retaguarda, independente da natureza da falta ser transitória ou permanente. O objetivo da seletividade é fazer com que o equipamento de proteção mais próximo ao defeito opere, independente da falta ser transitória ou permanente.

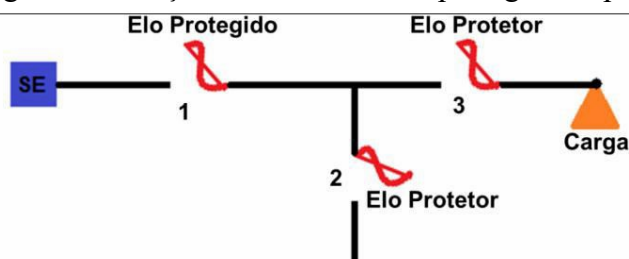
Ainda conforme explanado na GED 2912 (2016), o estudo da coordenação e da seletividade é realizado pela superposição das curvas característica tempo versus corrente, a fim de comparar o tempo de atuação dos dispositivos e definir as temporizações mais adequadas para cada equipamento.

2.8.1 Critérios de coordenação entre elos fusíveis

Ao longo das redes de distribuições existem vários elos fusíveis, por isso, é muito importante seguir alguns critérios de coordenação e seletividade, para evitar a interrupção o máximo possível. A fim de entender melhor a disposição dos elos fusíveis, apresenta-se a seguir a Figura 9, que demonstra a posição do elo fusível protegido e protetor, sendo possível

perceber que a função do elo protetor é proteger o elo protegido de possíveis falhas na rede de média tensão a jusante deste (RAMOS, 2014).

Figura 9 - Posição dos elos fusíveis protegidos e protetor



Fonte: Adaptada de RAMOS, 2014.

Complementando as afirmações acima, Mamede e Mamede Filho (2014) também referem que, por existirem inúmeros elos fusíveis instalados nos alimentadores de distribuição, é preciso empregar alguns critérios básicos de coordenação, a fim de evitar eliminação de coordenação.

O tempo de interrupção do elo fusível protetor deve ser de no máximo 75% do menor tempo de fusão do elo fusível protegido. Assim, dois elos fusíveis ligados em série podem atuar de maneira coordenada entre si para corrente de curto-circuito ou sobrecargas elevadas. Veja-se a fórmula a seguir (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014):

$$T_{máxf_d} \leq 0,75 \times T_{mínfa}$$

Onde:

$T_{mínfa}$ - tempo máximo de atuação do elo fusível protetor.

$T_{máxf_d}$ - tempo mínimo de atuação do elo fusível protegido

Existindo um elevado número de chaves fusíveis em série, torna-se impraticável a coordenação. Isso porque duas chaves em série, no máximo, devem ser aplicadas, complementando as necessidades de proteção através de religadores de distribuição e/ou seccionadores (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

É preciso reduzir o número de elos fusíveis aplicados nos alimentadores, sempre que possível, para que se possa ampliar a faixa de coordenação entre os elos fusíveis protegidos e protetores. A série de fusíveis mais recomendada é a 6 – 10 – 15 – 25 – 65 A (MAMEDE; MAMEDE FILHO, 2014).

Considerando o maior valor da corrente de curto-circuito no ponto de instalação do elo fusível protetor, o elo fusível protegido deve coordenar com o elo fusível protetor (MAMEDE, MAMEDE FILHO, 2014).

2.8.2 Critérios de coordenação entre religadores e elos fusíveis

Observa-se que devem ser seguidos critérios para a existência de coordenação entre religadores e elos fusíveis, conforme trecho a seguir:

Para que exista coordenação entre os religadores de distribuição e os elos fusíveis, devem ser admitidos os seguintes critérios:

- Ajustar, preferencialmente, o religador de distribuição para operar com a seguinte sequência de operação: duas operações rápidas e duas temporizadas.
- A curva tempo versus corrente da unidade de sobrecorrente de fase e de neutro não deve cortar a curva tempo versus corrente do elo fusível em todo o trecho protegido pelo religador.
- A curva tempo versus corrente da unidade de sobrecorrente de fase e de neutro deve estar acima da curva tempo 3 corrente do elo fusível em todo o trecho protegido pelo religador
- O afastamento entre a curva tempo versus corrente da unidade de sobrecorrente de fase e de neutro e a curva tempo 3 corrente do elo fusível em todo o trecho protegido pelo religador deve ser 0,20 s, para garantir a coordenação.
- O religador de distribuição deve ser ajustado para atuar seletivamente com o elo fusível para a menor corrente de curto-circuito no trecho onde o religador de distribuição é proteção de retaguarda, tanto para defeitos trifásicos como fase-terra.
- A unidade de sobrecorrente instantânea ou de tempo definida (curva rápida) deve ser ajustada para atuar com valor ligeiramente inferior à corrente de curto-circuito, valor simétrico, no trecho até onde o religador é proteção de retaguarda.
- A unidade de sobrecorrente instantânea ou de tempo definido de fase não deve atuar para a corrente de magnetização dos transformadores (MAMEDE, MAMEDE FILHO, 2014).

Frisa-se que se torna satisfatória a coordenação entre um religador e um elo fusível quando este último fundir durante a primeira operação temporizada do religador e não enquanto o religador realiza as suas operações rápidas. O religador precisa estar ajustado para operar na curva rápida e a seguir na curva temporizada (CAMPITELLI, 2007).

2.9 Prodist

2.9.1 Prodist Módulo 1

Destaca-se que a ANEEL elabora os Procedimentos de Distribuição (Prodist), juntamente de entidades, associações do setor elétrico nacional e dos agentes de distribuição,

os quais tem como objetivo normalizar e padronizar atividades técnicas ligadas ao funcionamento e desempenho de sistemas de distribuição de energia (ANEEL, 2018).

Importante destacar os principais objetivos do PRODIST, quais sejam:

- a) garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;
- b) propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- c) disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica;
- d) estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais;
- e) assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL;
- f) disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede (ANEEL, 2018).

O PRODIST (ANEEL, 2018) é composto por 11 módulos, os quais abrangem as macro áreas de ações técnicas dos agentes de distribuição, conforme demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Módulos que constituem o PRODIST

MÓDULO 1	MÓDULO 2	MÓDULO 3	MÓDULO 4	MÓDULO 5	MÓDULO 6	MÓDULO 7	MÓDULO 8	MÓDULO 9	MÓDULO 10	MÓDULO 11
INTRODUÇÃO	PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	ACESSO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	PROCEDIMENTOS OPERATIVOS DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	SISTEMAS DE ENERGIA	INFORMAÇÕES REVERIDAS E OBRIGAÇÕES	CÁLCULO DE PERDAS NA ENERGIA	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICOS	RESSARCIMENTO DE DANOS	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA REGULATÓRIO	FATURA DE ENERGIA ELÉTRICA E INFORMAÇÕES SUPLEMENTARES

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2019.

Salienta-se que na sequência será abordado com maior ênfase o tema do módulo 8, na medida em que apresenta a qualidade da energia elétrica, objetivo do presente trabalho.

2.9.2 Prodinst Módulo 8

Segundo a Resolução Normativa nº 794/2017, o módulo 8 do PRODIST passou pela sua décima revisão e entrou em vigor no dia 1º de janeiro de 2018. Este módulo apresenta os procedimentos referentes a qualidade da energia elétrica e também aborda a qualidade do serviço e do produto prestado (ANEEL, 2018).

Conforme mencionado na ANEEL (2018) o módulo é composto de três seções: a) qualidade do produto: determina a terminologia e os fenômenos, bem como estabelece os

indicadores e limites/valores de referência referentes à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão; b) qualidade do serviço: determina os conjuntos de unidades consumidoras, define e limita os procedimentos referentes aos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento; c) qualidade do tratamento de reclamações: determina a metodologia de cálculo dos limites do indicador de qualidade comercial - Frequência Equivalente de Reclamação (FER).

Ainda, conforme a ANEEL (2018), existem fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório, que são tratados como objetivo. Veja-se:

O objetivo é tratar os seguintes fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório:

- a) Permanente
 - i. tensão em regime permanente;
 - ii. fator de potência;
 - iii. harmônicos;
 - iv. desequilíbrio de tensão;
 - v. flutuação de tensão;
 - vi. variação de frequência.
- b) Transitório
 - i. variações de tensão de curta duração – VTCD.

2.9.2.1 Indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica

Frisa-se que a ANEEL, os consumidores, as centrais geradoras e as distribuidoras podem avaliar a qualidade do serviço prestado, bem como o desempenho do sistema elétrico. Isso é feito através do controle das interrupções, do cálculo e da divulgação dos indicadores de continuidade de serviço (ANEEL, 2018).

Deve-se calcular os indicadores para períodos de apuração mensais, trimestrais e anuais, exceto o indicador DICRI, o qual deve ser apurado por interrupção ocorrida em Dia Crítico (ANEEL, 2018).

2.9.2.1.1 Indicadores de continuidade de conjunto de unidades consumidoras.

Conforme ANEEL (2018), os indicadores de continuidade de conjunto de unidades consumidoras devem ser apurados para cada conjunto de unidades consumidoras, conforme a seguir discriminados:

a) Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) - é expressa em horas e centésimos de hora e revela o tempo que cada consumidor do conjunto permaneceu sem o fornecimento de energia elétrica, utilizando a seguinte fórmula:

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

b) Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) - é expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções, que cada consumidor do conjunto sofreu, utilizando a seguinte fórmula:

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

Destaca-se que cada variável supramencionada apresenta um significado diferenciado, conforme descrito a seguir:

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(*i*) = Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, excluindo-se as centrais geradoras;
 FIC(*i*) = Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, excluindo-se as centrais geradoras. (ANEEL, 2018).

2.10 Reconfiguração de redes

As redes de distribuição de energia elétrica apresentam algumas peculiares características, tais como: a sua configuração radial, várias bifurcações (ramais), composições de carga diferentes, como as residenciais, comerciais e industriais, bem como variações típicas diárias. Ademais, alguns requisitos essenciais de qualidade do fornecimento de energia devem ser observados em uma rede de distribuição, como, por exemplo, indicadores de continuidade e limites de tensão (BERNADON et. al, 2015).

Bernadon, et. al (2015), ainda refere que a abertura ou o fechamento de dispositivos de manobra ou de proteção (chaves, religadores), podem alterar a tipologia de uma rede de distribuição.

Destaca-se que, ao ocorrer um defeito em um ponto da rede de distribuição, devem ser tomadas algumas medidas, conforme transcrito a seguir:

Considerando que a reconfiguração ocorre em condições de contingência, deseja-se que a solução seja identificada rapidamente, restringindo ao mínimo a área desenergizada. De uma maneira geral, quando ocorrer um defeito em um ponto qualquer da rede, as seguintes ações devem ser tomadas: identificar o local onde o defeito ocorreu; isolar a menor parte possível do sistema através da abertura de chaves; manobrar as chaves para restabelecer o suprimento para os consumidores a jusante do bloco isolado; corrigir o problema; realizar novas manobras de chaves para retornar o estado normal das redes (BERNADON, 2007).

3 METODOLOGIA

O método utilizado para a elaboração do presente trabalho foi o estudo de caso, no qual foram explorados dados de dois alimentadores rurais de redes de distribuição de média tensão, com uma análise dos indicadores de continuidade de serviço DEC e FEC, de diagramas unifilares, correntes de cargas, bem como foram coletadas algumas informações das correntes de curto-circuito de determinados pontos da rede elétrica.

Há uma relação entre esses dois alimentadores, pois existe um ponto de interligação entre elas (chave fusível), sendo que no caso de uma contingência, uma das fontes de alimentação pode suprir a demanda responsável pela outra. Por isso, algumas informações foram coletadas para diversos casos e serão melhor explanados adiante.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram obtidos indicadores e índices por meio de uma Permissionária localizada na região do Alto Uruguai no Estado no Rio Grande do Sul, Brasil, a qual realiza parte da distribuição de energia elétrica na localidade.

3.1 Estudo de caso

Para o desenvolvimento do trabalho foram coletados os dados necessários para o desenvolvimento do trabalho, como: característica do diagrama unifilar do sistema elétrico, grandezas elétricas de operação do sistema, componentes do sistema de proteção e correntes de curto-circuito.

Destaca-se que o estudo principal do presente trabalho é a análise da proteção da parte troncal, onde há uma maior deficiência no que tange a coordenação e seletividade dos dois alimentadores de distribuição. Nota-se que, quando analisadas suas ramificações, poucos são os equipamentos de proteção que possuem a necessidade de ajuste em sua coordenação. Com isso, o foco principal do estudo de proteção dos alimentadores está na linha troncal, onde os dados apontaram maior falta de coordenação.

Na Figura 11, é apresentado um diagrama unifilar dos dois alimentadores de distribuição.

distribuição convencional rural. Destaca-se que o ponto inicial do alimentador ocorre através de um sistema de distribuição primário, conectados por meio de um religador. O circuito é constituído por meio da tipologia de rede de distribuição convencional, com configuração de distribuição radial sem recurso.

Frisa-se que o religador e as chaves fusíveis formam o sistema de proteção contra surtos de corrente, como o curto circuito, por exemplo. Reitera-se que é apenas um religador, que fica instalado no início. Isso porque trata-se de um dispositivo telecomandado, onde as configurações se realizam na central de controle. As chaves fusíveis possuem as características dos elos fusíveis e são instaladas em cartuchos.

3.1.1.1 Análise da proteção atual do alimentador JA

Verifica-se que no Anexo A demonstra o diagrama unifilar do alimentador JA, bem como todas as chaves fusíveis com os seus respectivos valores de elos e o ponto de interligação, que é a chave de conexão entre os dois alimentadores.

O alimentador está composto por um religador, com configurações de proteção descritas na figura 12. Após o religador, existe uma chave fusível, com valor de elo de 40k, localizado no meio do alimentador. Em seguida, nos ramais, existem as proteções com os elos de sequência preferencial. Ou seja, após o elo de 40k, contém o elo de 25k, em seguida o de 15k, posteriormente o de 10k e, assim, sucessivamente, conforme a ordem lógica.

A Figura 12 demonstra os valores que são adotados para a configuração do religador

Figura 12 - Configurações dos parâmetros do religador 1701

The screenshot shows the 'Simplified Setup' window for a 1701 recloser. The 'Operations Sequence' section is highlighted with red circles, showing the following settings:

TCC1	TCC2	Min Trip	Trip #1	Trip #2	Trip #3	Trip #4
Ph 101	132	80	TCC1	TCC2	TCC2	TCC2
Gd 101	132	35	TCC1	TCC2	TCC2	TCC2

The 'System Configuration' section shows the following settings:

- Group: Normal
- Description: RL JACUTINGA
- Connected...: A/BAB B/BC C/CA
- PT Ratio (x:1): 1.000, 1.000, 1.000
- Adjust (deg): 0.000, 0.000, 0.000
- V expected: 7.967
- CT Type: 1Amp
- CTR (1A): 1000
- CTR (5A): 1200.000
- System Frequency: 60

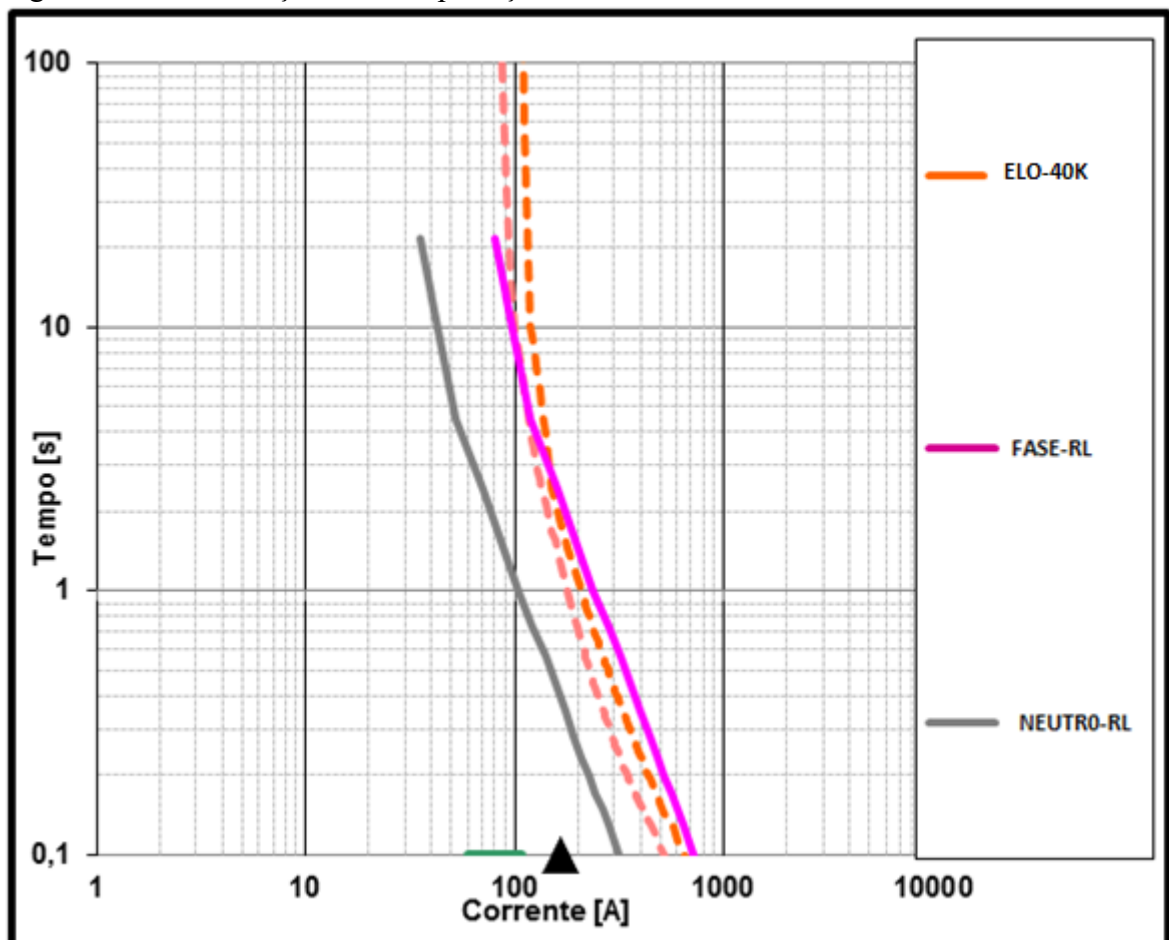
Fonte: Adaptado de Permissionária "X", 2019

As configurações demonstradas na Figura 12 são as seguintes: curva para corrente de fase instantânea – 101; curva para corrente de neutro instantâneo – 101; curva para corrente de fase temporizada – 132; curva para corrente de neutro temporizado – 132; corrente de disparo de fase – 80 A; corrente de disparo de neutro – 35 A.

Observa-se que os religadores utilizam curvas com tempo definido ou curvas combinadas de tempo definido somando-se a curva de operação instantânea, as quais podem ser definidas pelo engenheiro responsável. Outrossim, a curva 101 existente em religadores é pré-estabelecida pelo fabricante.

O gráfico da figura 13 seguir demonstra a situação da proteção do alimentador nos principais equipamentos da parte troncal, como por exemplo, a coordenação do religador com o primeiro elo contido após o mesmo. Ainda, pode-se observar como são as curvas descritas anteriormente.

Figura 13 - Coordenação atual da proteção do alimentador JA

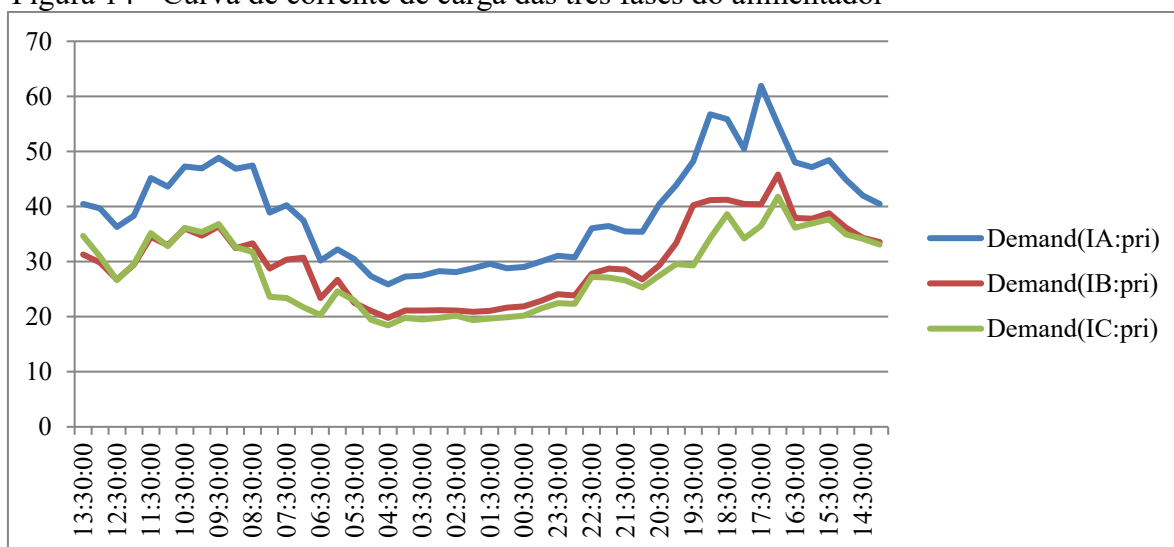


Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Conforme a Figura 13, há uma coordenação entre o religador e o elo de 40k, pois, para ter uma coordenação, a curva do elo deve estar entre a curva de neutro e a de fase do religador. Porém, não é uma coordenação totalmente efetiva, pois a partir de uma determinada corrente, o religador atuará antes que o elo.

A fim de demonstrar dados que são necessários para o desenvolvimento dos cálculos referentes aos ajustes da proteção dos equipamentos, elaborou-se um gráfico com a curva de corrente de carga das três fases do alimentador.

Figura 14 - Curva de corrente de carga das três fases do alimentador



Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

O gráfico da Figura 14 demonstra a curva de carga das três fases de corrente, onde esses dados são necessários para a definição dos parâmetros do sistema de proteção.

3.1.2 Alimentador de distribuição CZ

O alimentador rural de distribuição de energia elétrica CZ opera com tensão de 13,8 kV de linha primária e atende cerca de 469 consumidores por meio de uma subestação de distribuição de energia. Este circuito é formado por uma tipologia de rede de distribuição convencional rural, com configuração de distribuição radial sem recurso e o sistema é protegido por um religador e chaves-fusíveis.

3.1.2.1 Análise da proteção atual do alimentador CZ

Registra-se, de início, que assegurar a desconexão de todo sistema elétrico ou ao menos de parte dele, que esteja submetido a anormalidades que o façam operar fora dos limites previstos, é considerada a principal função de um sistema de proteção. Ademais, o sistema de proteção também tem a função de fornecer aos responsáveis por sua operação as informações necessárias, a fim de facilitar a identificação dos defeitos, bem como de sua consequente recuperação (MAMEDE, MAMEDE FILHO, 2014).

É de suma importância analisar como apresenta-se a real situação da proteção, pois é a partir desta análise que será verificado se os componentes de proteção deverão ser substituídos ou se alguns parâmetros deverão ser alterados.

Verifica-se que no Anexo A demonstra o diagrama unifilar do alimentador CZ, bem como todas as chaves fusíveis com os seus respectivos valores de elos e o ponto de interligação, que é a chave de conexão entre os dois alimentadores.

O alimentador está composto por um religador, com configurações de proteção descritas na Figura 15. Após o religador, existe uma chave fusível, com valor de elo de 40k, localizado no meio do alimentador. Em seguida, nos ramais, existem as proteções com os elos de sequência preferencial. Ou seja, após o elo de 40k, contém o elo de 25k, em seguida o de 15k, posteriormente o de 10k e, assim, sucessivamente, conforme a ordem lógica.

A Figura 15 demonstra os valores que são adotados para a configuração do religador

Figura 15 - Configurações dos parâmetros do religador 2

The screenshot displays the 'Simplified Setup' window for a recloser configuration. Key sections include:

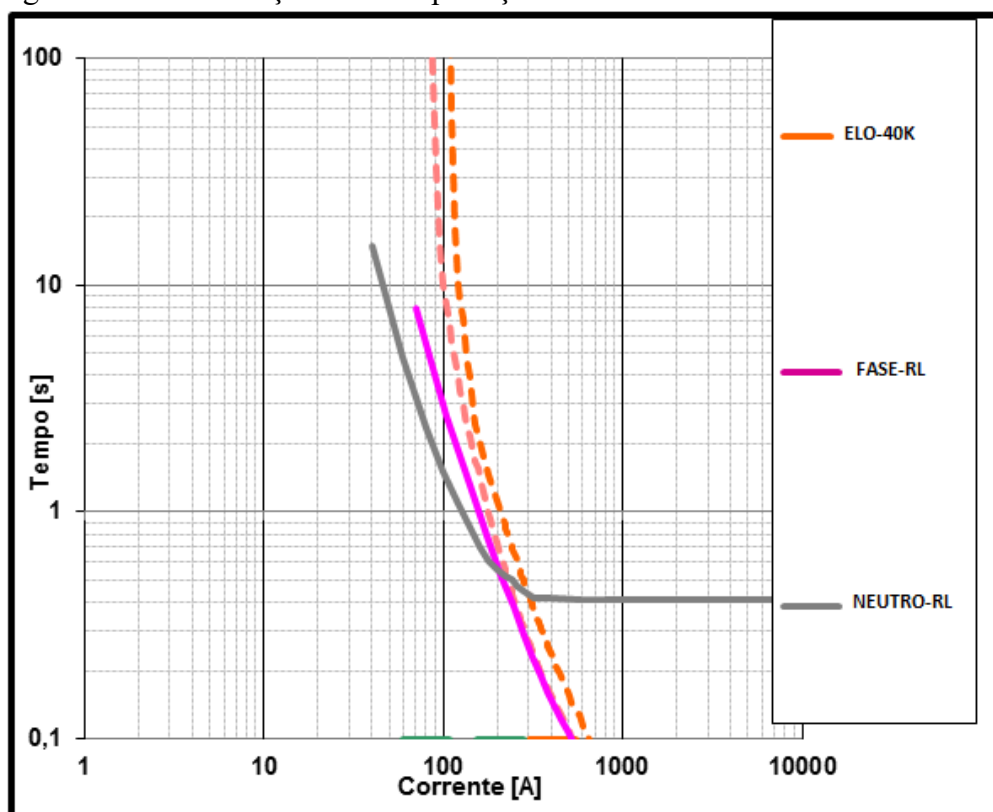
- Operations Sequence:** A table with columns for TCC1, TCC2, Min Trip, Trip #1, Trip #2, Trip #3, and Trip #4. Red circles highlight the 'Min Trip' values (70, 70, 70, 70) and the 'Trip #1' values (3, 3, 3, 3).
- System Configuration, PT/Bushing Connections:** Description: CRUZALTENSE. Connected...: A/B/C, B/B/C, C/C/A. PT Ratio (x:1): 2200.000, 1.000, 2200.000. Adjust (deg): -174.400, 0.000, -174.400.
- Complex TCC:** Settings for TCC1 and TCC2, including Time Multiplier, Time Adder, and Min Rsp Time.
- High Current Trip:** Settings for HCT, Min Trip Mult, and Time Delay for TCC1 and TCC2.
- Cold Load Pickup:** Settings for TCC, Min Trip, Time Mult, Time Adder, and Min Rsp Time.
- High Current Lockout:** Settings for Pickup, Trip #1, Trip #2, and Trip #3.

Fonte: Adaptado de Permissionária "X", 2019

As curvas demonstradas na figura acima são as seguintes: curva para corrente de fase instantânea – 101; curva para corrente de neutro instantâneo – 101; curva para corrente de fase temporizada – 118; curva para corrente de neutro temporizado – 134; corrente de disparo de fase – 70 A; corrente de disparo de neutro – 40 A.

O gráfico da Figura 16 demonstra a situação da proteção do alimentador nos principais equipamentos da parte troncal, como por exemplo, a coordenação do religador com o primeiro elo contido após o mesmo. Ainda nesse gráfico, pode-se observar como são as curvas descritas anteriormente.

Figura 16 - Coordenação atual da proteção da rede CZ

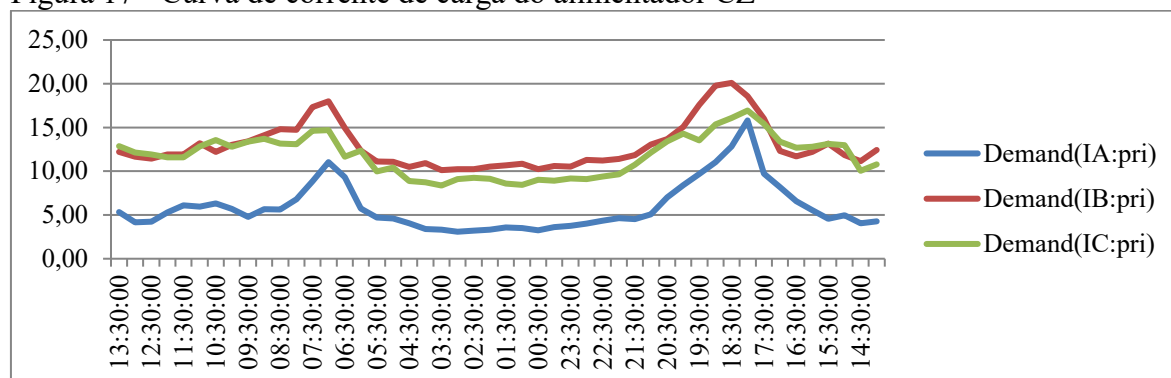


Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

De acordo com a Figura 16, nota-se que não existe coordenação entre o religador e o elo de 40k, pois a curva do elo não está localizada entre a curva de neutro e de fase do religador, e sim praticamente acima da curva de fase do religador.

A fim de demonstrar dados que são necessários para o desenvolvimento dos cálculos referentes aos ajustes da proteção dos equipamentos, elaborou-se um gráfico com a curva de corrente de carga das três fases do alimentador.

Figura 17 - Curva de corrente de carga do alimentador CZ



Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

O gráfico da Figura 17 demonstra a curva de carga das três fases de corrente, onde esses dados são necessários para a definição dos parâmetros do sistema de proteção.

3.2 Apuração dos indicadores de continuidade

A ANEEL (2019) estabelece que devem ser consideradas todas as interrupções para apurar os indicadores DEC e FEC, porém, com algumas exceções, tais como as citadas a seguir:

- i. falha nas instalações da unidade consumidora que não provoque interrupção em instalações de terceiros;
- ii. interrupção decorrente de obras de interesse exclusivo do consumidor e que afete somente a unidade consumidora do mesmo;
- iii. Interrupção em Situação de Emergência;
- iv. suspensão por inadimplemento do consumidor ou por deficiência técnica e/ou de segurança das instalações da unidade consumidora que não provoque interrupção em instalações de terceiros, previstas em regulamentação;
- v. vinculadas a programas de racionamento instituídos pela União;
- vi. ocorridas em Dia Crítico;
- vii. oriundas de atuação de Esquema Regional de Alívio de Carga estabelecido pelo NOS.

Outrossim, destaca-se que devem ser registradas algumas informações para cada conjunto que vier a ser afetado por interrupções de longa duração, por exemplo: a quantidade de unidades consumidoras do conjunto em cada mês; o código de identificação desse conjunto (ANEEL, 2019).

Constata-se que para cada uma dessas interrupções de longa duração deve-se levar em conta: o código único da interrupção, estabelecido pela distribuidora; a data e horário do início e do restabelecimento da interrupção; o fato gerador; a quantidade de unidades

consumidoras atingidas pela interrupção; o nível de tensão onde verificou-se o fato gerador e o código de identificação de cada unidade consumidora (ANEEL, 2019).

A Tabela 2 apresenta dados referentes a cada interrupção dos dispositivos do alimentador CZ.

Tabela 2 - Dados do alimentador CZ referentes a cada interrupção dos dispositivos

Dispositivos de proteção	Nº de interrupções	Consumidores atingidos	Tempo (horas)
002	74	4299	6.782,61
99999	7	915	2.458,91
2	1	422	928,4

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

A Tabela 3 demonstra a apuração dos indicadores DEC e FEC realizados no período dos últimos 12 meses, referente ao alimentador CZ.

Tabela 3 - Apuração do DEC e FEC realizado nos últimos 12 meses do alimentador CZ

Alimentador	Nº de consumidores	DEC apurado	FEC apurado
CZ	469	21,68	12,01

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Na Tabela 4 são apresentados dados referentes a cada interrupção dos dispositivos do alimentador JA.

Tabela 4 - Dados do alimentador JA referentes a cada interrupção dos dispositivos

Dispositivos de proteção	Nº de interrupções	Consumidores atingidos	Tempo (Horas)
2099	10	434	412,08
017	56	4149	7.106,46
1701	8	725	1.089,50
2108	6	542	1.065,96
2104	8	1205	1.856,86

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

A Tabela 5 demonstra a apuração dos indicadores DEC e FEC realizados no período dos últimos 12 meses, referente ao alimentador JA.

Tabela 5 - Apuração do DEC e FEC realizado nos últimos 12 meses do alimentador JA

Alimentador	Nº de consumidores	DEC apurado	FEC apurado
JA	421	27,38	16,77

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

3.3 Limites dos indicadores coletivos

De acordo com a metodologia e os objetivos apresentados no presente trabalho, serão abordados neste capítulo, os resultados decorrentes da comparação dos indicadores de continuidade dos dois alimentadores (CZ e JA) com os limites de indicadores, dados estes, coletados de duas fontes, quais sejam: ANEEL e Permissionária “X”.

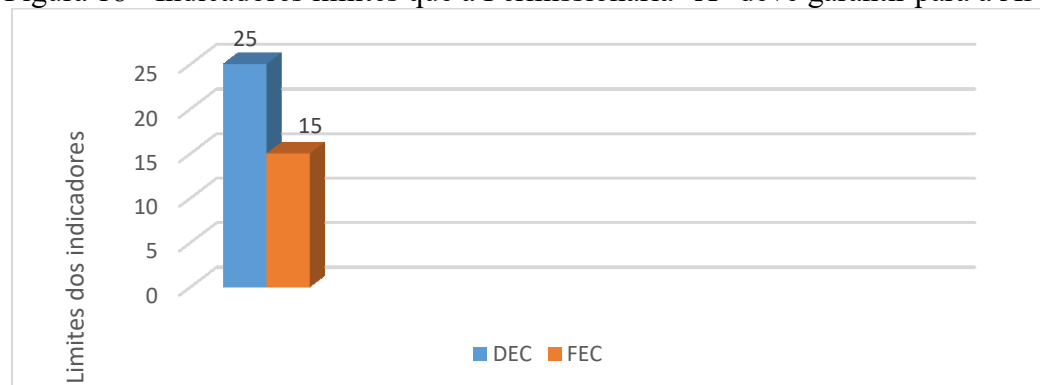
A (ANEEL) é uma autarquia vinculada ao Ministério de Minas e Energia, localizada no Distrito Federal, e possuiu como objetivo a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica, de acordo com as políticas e diretrizes do governo federal.

A Permissionária “X” é uma distribuidora de energia localizada na região do Alto Uruguai Gaúcho, a qual disponibilizou todos os dados necessários para o desenvolvimento do presente trabalho, como os referentes a dois alimentadores de distribuições (CZ e JA).

Destaca-se que a ANEEL (2019) exige das permissionárias um determinado padrão de continuidade mínimo, a fim de manter uma boa qualidade no fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Para tanto, impõe limites para os indicadores coletivos de continuidade, que são: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC).

Na Figura 19, são demonstrados os limites dos indicadores DEC e FEC determinados pela ANEEL, que a Permissionária X necessita garantir para a ANEEL que os valores fiquem abaixo dos limites.

Figura 18 - Indicadores limites que a Permissionária "X" deve garantir para a ANEEL



Fonte: Adaptada de ANEEL, 2019; Permissionária “X”, 2019.

Assim, conclui-se que a Permissionária X necessita garantir para a ANEEL os valores dos indicadores dentro dos limites por uma duração de 5 anos, o que estimula as permissionárias a melhorarem a qualidade na prestação dos seus serviços de distribuição de energia elétrica a seus consumidores.

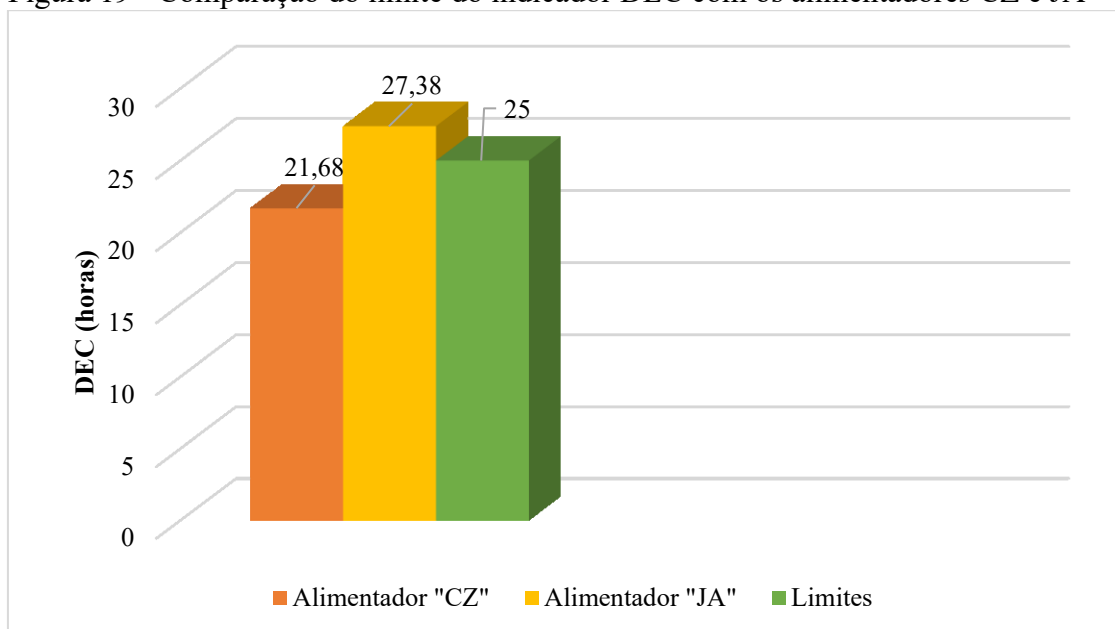
3.5 Desempenho dos indicadores coletivos

No presente item será realizada uma comparação entre os indicadores DEC e FEC dos dois alimentadores de distribuição, CZ e JA, e os limites dos indicadores fornecidos pela ANEEL. Os dados apresentados nos próximos gráficos são referentes aos últimos 12 meses.

Os resultados obtidos por meio da comparação do indicador DEC dos dois alimentadores JA e CZ com o limite do mesmo, no ano de 2019, estão demonstrados na Figura 20, que apresenta os dados do indicador DEC em horas.

Ao analisar a Figura 20, concluiu-se que o alimentador JA ultrapassa o limite de DEC, e o alimentador CZ não ultrapassa o limite. Portanto, somente o alimentador JA esta ultrapassando os limites da ANEEL.

Figura 19 - Comparação do limite do indicador DEC com os alimentadores CZ e JA

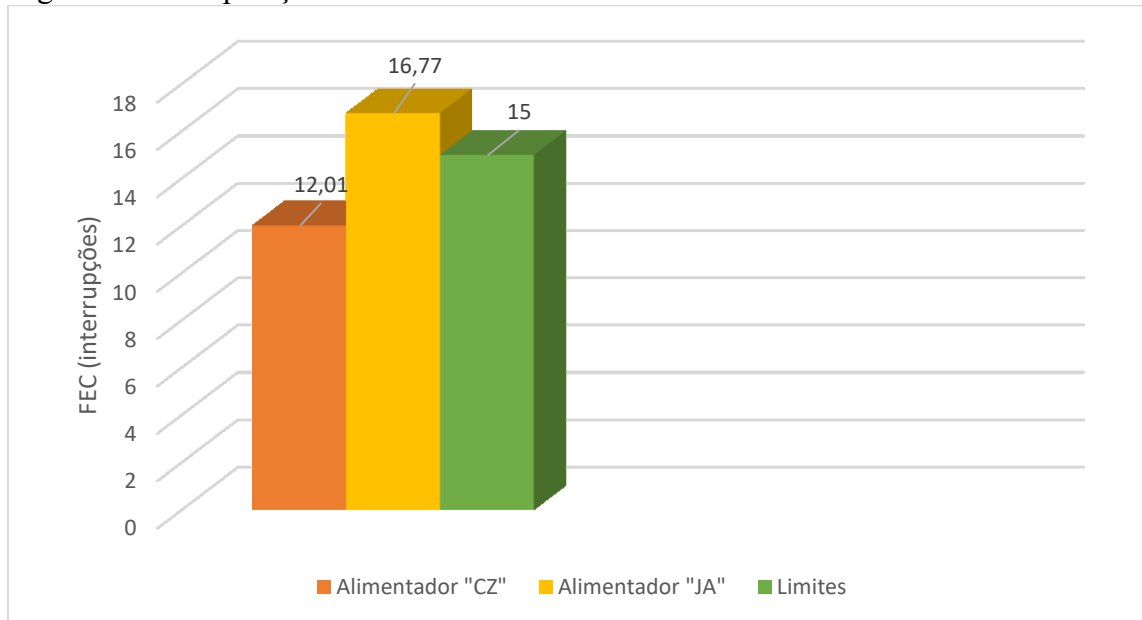


Fonte: Adaptada de ANEEL, 2019; Permissionária "X", 2019

Na Figura 21 é demonstrado o comparativo do limite do indicador FEC com os alimentadores CZ e JA. Verifica-se que o alimentador JA ultrapassou o limite de FEC. O

alimentador CZ não ultrapassou o limite. Portanto, somente o alimentador JA esta ultrapassando os limites da ANEEL e, assim, estaria sendo penalizado.

Figura 20 - Comparação do limite do indicador FEC com os alimentadores CZ e JA



Fonte: Adaptada de ANEEL, 2019; Permissionária “X”, 2019.

Analisando ambos os resultados das Figuras 20 e 21, verifica-se que o alimentador JA esta ultrapassando os limites DEC e FEC impostos pela ANEEL. Sendo que a Permissionária “X” será penalizada por ter violado esses limites, tanto para a ANEEL quanto para as unidades consumidoras atingidas.

A principal contribuição para a ultrapassagem desses indicadores é o fato de que os alimentadores contêm um só equipamento telecomandado cada. Sendo assim, em casos eventuais, a fim de deixar o menor número de consumidores sem energia, faz-se manobras. Entretanto, essas manobras devem ser efetuadas manualmente, tendo em vista que os equipamentos não são telecomandados, o que leva, inclusive, muito tempo para o deslocamento de uma equipe fazer uma ou mais manobras. Tempo esse em que os consumidores permanecem sem energia, contribuindo para o aumento dos indicadores.

3.6 Análise de três casos reais

No presente item, serão apresentados e analisados três casos reais, relacionados com as fontes de JA e CZ, onde cada fonte alimenta uma cidade distinta, porém, entre elas existe um ponto de conexão que liga dois alimentadores, para o caso de ocorrer alguma falha e/ou uma

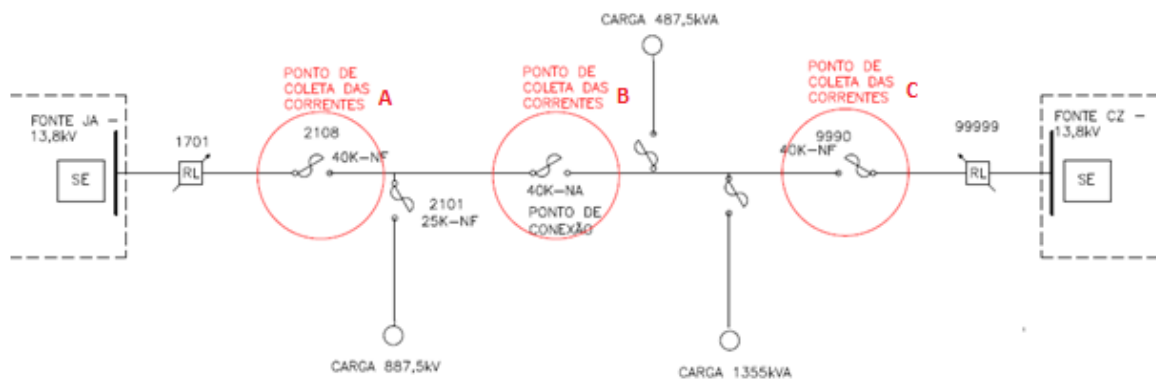
das fontes deixar de alimentar seu respectivo trecho. Esses casos foram analisados levando em consideração as piores hipóteses possíveis, sendo os casos 2 e 3, explicados a seguir.

3.6.1 Caso 1: Ponto de conexão entre os alimentadores abertos

Quando o ponto de conexão estiver aberto, significa que os alimentadores estão operando em situação normal (ideal), ou seja, a fonte de JA está alimentando a sua respectiva carga, assim como a fonte de CZ está alimentando a sua.

A seguir, será apresentado na Figura 16 o resumo do diagrama unifilar dos alimentadores CZ e JA, indicando também os pontos de coleta das correntes de curto circuito (A, B e C). Neste caso, o ponto de conexão entre os dois alimentadores é normalmente aberto, fazendo com que os mesmos trabalhem em situação normal (ideal).

Figura 21 - Diagrama unifilar resumido dos alimentadores CZ e JA



Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Nas tabelas 6, 7 e 8 serão demonstradas as correntes de curto-circuito monofásicas simétrica mínima, nos principais pontos indicados anteriormente na figura 21, dos alimentadores JA e CZ.

A Tabela 6 apresenta os valores de correntes de curto-circuito em amperes, dos pontos inicial e final do alimentador CZ. No momento em que a chave, no ponto de conexão entre os alimentadores, está normalmente aberta (NA), o alimentador CZ distribui energia só para seu respectivo trecho.

Tabela 6 - Corrente de curto-circuito monofásica simétrica mínima do início e fim do alimentador CZ

Ponto inicial (C)	Ponto final (B)
132A	112A

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

A Tabela 7, apresenta os valores de correntes de curto-circuito em amperes, do ponto inicial e final do alimentador JA. No momento em que a chave, no ponto de conexão entre os alimentadores, está normalmente aberta (NA), o alimentador JA distribui energia só para seu respectivo trecho.

Tabela 7 - Corrente de curto-circuito monofásica simétrica mínima do início e fim do alimentador JA

Ponto inicial (A)	Ponto final (B)
182A	117A

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

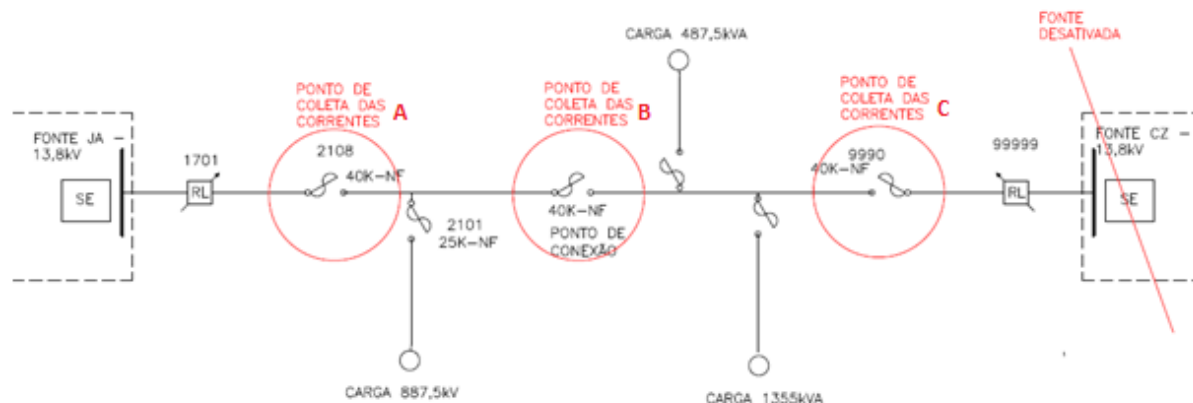
3.6.2 Caso 2: Ponto de conexão fechado com fonte de JA alimentando

No momento em que ocorrer eventual falha na fonte de CZ, e ela deixar de alimentar a sua respectiva demanda de consumidores, o ponto de conexão é fechado e, assim, o alimentador JA passa a distribuir energia para o outro grupo de consumidores.

Porém, nesse caso podem ocorrer anomalias, na medida em que os alimentadores estão projetadas para trabalhar como no caso 1. Assim, os níveis de corrente de curto-circuito em alguns dos pontos são alterados, podendo interromper a distribuição de energia e, consequentemente, elevar os indicadores de continuidade já apresentados anteriormente.

Na Figura 22 é apresentado o resumo do diagrama unifilar dos alimentadores CZ e JA, onde a fonte de CZ está desenergizada por conta de alguma contingência. Será indicado também os pontos de coleta das correntes de curto circuito (A,B e C). Neste caso, o ponto de conexão entre os dois alimentadores é normalmente fechado, onde somente a fonte de JA está alimentando.

Figura 22 - Diagrama unifilar resumido da fonte de JA alimentando os dois trechos



Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

A Tabela 8 apresenta as correntes de curto-circuito nos principais pontos dos alimentadores analisados. Nesse caso, o alimentador JA está fornecendo energia aos consumidores dos dois trechos, assim, conclui-se que o ponto final está localizado onde antes era o ponto inicial do alimentador CZ.

Tabela 8 - Corrente de curto-circuito monofásica simétrica mínima nos pontos abaixo com a fonte de JA alimentando

Ponto inicial (A)	Ponto de conexão (B)	Ponto final (C)
182A	112A	96A

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

3.6.3 Caso 3: Ponto de conexão fechado com fonte fornecendo energia ao alimentador CZ

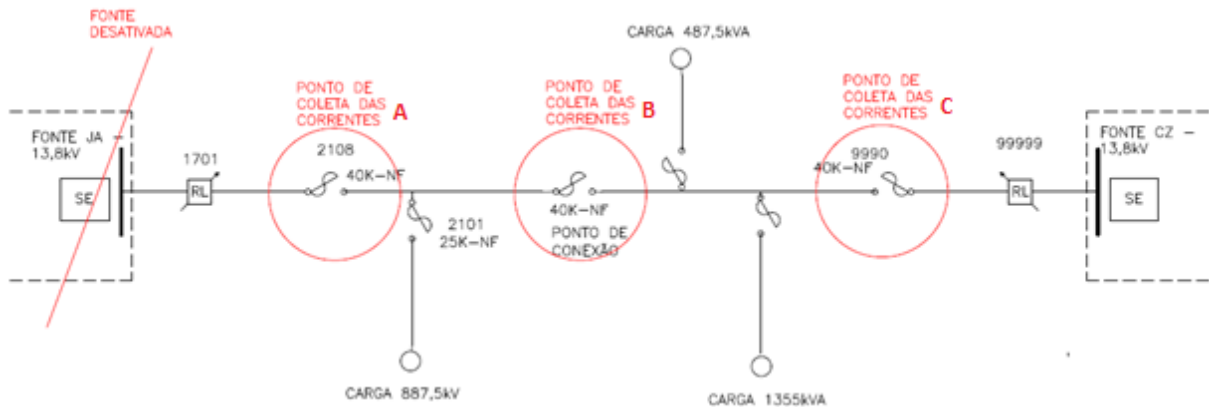
Do mesmo modo que a fonte de CZ pode vir a ser desativada, a fonte de JA, também. Isso ocorrendo, o ponto de conexão será fechado e o alimentador CZ irá distribuir energia entre os dois trechos.

Como citado no caso anterior, os alimentadores não estão projetados para trabalhar nesse contexto, o que pode interromper o fornecimento de energia por conta de correntes de curto-circuito estarem sendo alteradas, assim, alterar junto os seus indicadores de continuidade.

A Figura 23 apresenta o resumo do diagrama unifilar dos alimentadores CZ e JA, onde a fonte de JA está desenergizada por conta de alguma contingência. Será indicado também os pontos de coleta das correntes de curto circuito (A, B e C). Neste caso, o ponto de conexão

entre os dois alimentadores é normalmente fechado, onde somente a fonte de CZ está alimentando.

Figura 23 - Diagrama unifilar resumido das fontes de CZ alimentando os dois alimentadores



Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

A Tabela 9 apresenta as correntes de curto-circuito nos principais pontos dos alimentadores analisados. Nesse caso, o alimentador CZ está fornecendo energia aos consumidores dos dois trechos, assim, conclui-se que o ponto final é localizado onde antes era o ponto inicial do alimentador JA.

Tabela 9 - Corrente de curto-circuito monofásica simétrica mínima nos pontos abaixo com a fonte de CZ alimentando

Ponto inicial (C)	Ponto de conexão (B)	Ponto final (A)
132A	112A	86A

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

3.7 Comparação das correntes de curto-circuito

No item 3.3 do presente trabalho foram analisados três casos efetivamente ocorridos com os dois alimentadores, CZ e JA e neste item será comparado as correntes de curto circuito dos pontos iniciais, finais e conexão.

Na Tabela 10 está explícita a comparação das correntes de curto-circuito dos três casos, mas somente dos pontos de conexão dos alimentadores. Observa-se que as correntes de curto circuito, no ponto de conexão tem uma pequena diferença, que não é tão significativa. Essas correntes de curto-circuito são iguais nos casos 1. O que as diferencia é o momento em que a fonte de JA está alimentando (caso 2) ou o momento em que a fonte de CZ está

alimentando (caso 3) todo o trecho, pois, ocorre uma pequena diferença das correntes de curto-circuito explícitas abaixo.

Tabela 10 - Comparação das correntes de curto-circuito monofásica simétrica mínima dos pontos de conexão dos alimentadores

	Ponto de conexão da JA (B)	Ponto de conexão CZ (B)
Corrente (amperes)	117	112

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Na Tabela 11 está demonstrada a comparação das correntes de curto-circuito do ponto final do alimentador JA, quando a mesma está alimentando (caso 2), com o ponto inicial do alimentador CZ, para o caso 1 e para o caso 3. As correntes para o ponto inicial do alimentador CZ, no caso 1 e 3, são iguais. Verifica-se que a localização do ponto final do alimentador JA, é o mesmo do ponto inicial do alimentador CZ, por isso da comparação.

Assim, percebe-se que, na comparação do ponto final do alimentador JA (caso 2) com o ponto inicial da CZ (caso 1 e 3), ocorre uma grande diferença na corrente de curto-circuito. Este ponto está coordenado para as correntes de curto-circuito, como para o caso 1, por exemplo os 132A, e, quando no caso 2 a fonte de JA está alimentando, a corrente de curto-circuito cai para 96A. Dessa forma, podem os componentes de proteção nem sentir essa pequena corrente de curto-circuito, pois estão coordenados para uma corrente maior.

Tabela 11 - Comparação das correntes de curto-circuito monofásica simétrica mínima do ponto final da JA com o ponto inicial da CZ, quando a fonte de JA está alimentando

	Ponto final da JA (C)	Ponto inicial da CZ (C)
Corrente (amperes)	96	132

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Outrossim, na Tabela 12 está demonstrada a comparação das correntes de curto-circuito do ponto final do alimentador CZ, quando a mesma está alimentando (caso 3), com o ponto inicial do alimentador JA, para o caso 1 e para o caso 2. As correntes para o ponto inicial do alimentador JA, no caso 1 e 2, são iguais. Verifica-se que a localização do ponto final do alimentador CZ, é o mesmo do ponto inicial do alimentador JA, por isso da comparação.

Assim, percebe-se que, na comparação do ponto final do alimentador CZ (caso 3) com o ponto inicial da JA (caso 1 e 2), ocorre uma grande diferença na corrente de curto-circuito. Este ponto está coordenado para as correntes de curto-circuito, como para o caso 1, por exemplo os 182A, e, quando no caso 3 a fonte de CZ está alimentando, a corrente de curto-circuito cai para 86A. Dessa forma, podem os componentes de proteção nem sentir essa pequena corrente de curto-circuito, pois estão coordenados para uma corrente maior.

Tabela 12 - Comparação das correntes de curto-circuito monofásica simétrica mínima do ponto final da CZ com o ponto inicial da JA, quando a fonte de CZ está alimentando

	Ponto final da CZ (A)	Ponto inicial da JA (A)
Corrente (amperes)	86	182

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

3.8 Proposta de melhorias

Objetivando melhorar as condições das proteções dos dois alimentadores de distribuição, foram analisadas todas as configurações das proteções descritas neste capítulo, ocasião em que se verificou a falta de coordenação e seletividade.

Diante dos dados coletados, percebeu-se que existem muitos equipamentos de proteção no alimentador, são poucos os que efetivamente precisam ser substituídos, com detalhes importantes a serem ajustados.

O religador é o principal equipamento de proteção e será instalado no final dos dois alimentadores, no lugar da chave de manobra, 17413. A principal função dele será apresentada nos casos 2 e 3, descritos no item 3.6. Para o caso 1, não terá função na proteção, ficará como uma chave normalmente aberta (NA). No caso 2 e 3, quando a fonte de JA ou a CZ está alimentando os dois trechos, o religador trabalhará com uma parametrização, que será descritas adiante. Ressalta-se, que as propostas de melhorias foram feitas pensando nos piores casos que podem ocorrer, ou seja, na perda de um dos dois alimentadores.

Outrossim, quando ocorre a necessidade de atuar no caso 2 ou 3, o alimentador não tem capacidade para suportar a demanda. Isso porque, somando os valores das correntes de cargas dos dois alimentadores, se ultrapassa o valor da corrente de disparo de fase determinadas nas configurações dos dois religadores que já fazem parte da proteção, assim necessitando alterar os ajustes desses equipamentos, que serão demonstrados a seguir.

3.8.1 Proposta de melhorias no alimentador JA

Diante da necessidade de aumentar a confiabilidade da proteção no alimentador, o presente trabalho propôs a troca da chave fusível 2104, localizada no meio do alimentador, por uma chave manobra, deixando, dessa forma, a parte troncal somente com o religador 1701, que está localizado após o alimentador. Porém, têm-se a necessidade de instalação de um novo equipamento, um novo religador, localizado no final do seu trecho, ou seja, no lugar da chave NA (17413), onde faz-se a manobra em casos de contingências. Tem-se também a necessidade da alteração de um elo fusível localizado em um dos ramais, cujas descrições estão melhor demonstradas na Tabela 13.

Tabela 13 - Alteração dos equipamentos de proteção do alimentador JA

Nº Equipamento	Equipamento Atual	Alteração Proposta
2104	Chave Fusível Elo 40k	Chave Seccionadora De manobra
17412	Elo Fusível 10k	Elo Fusível 15k
17413	Chave Seccionadora de De manobra	Religador Telecomandado

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Outrossim, é preciso alterar algumas configurações do religador já existentes (1701). Essas configurações serão apresentadas a seguir. As ramificações do alimentador serão compostas por sistema de proteção apenas do tipo chaves fusíveis.

Abaixo estão apresentados os dados da parametrização do religador 1701, já existente:

- Operações: uma instantânea e uma temporizada;
- Tempo de reset: 60 segundos;
- Tempo de religamento: 2 segundos;
- Curva para corrente de fase instantânea: 101;
- Curva para corrente de neutro instantânea: 101;
- Curva para corrente de fase temporizada: 135;
- Curva para corrente de neutro temporizado: 113;
- Corrente de disparo de fase: 100 A;
- Corrente de disparo de neutro 20 A;

3.8.2 Proposta de melhorias no alimentador CZ

A proposta de melhorias para este alimentador ocorre por meio da substituição da chave fusível, que está localizada no meio do alimentador (2097), por uma chave manobra, com a parte troncal, somente com o religador como proteção. Este mesmo religador precisa de alteração de ajustes em alguns parâmetros das suas configurações, as quais serão apresentadas adiante.

Porém, existe a necessidade de instalação de um novo equipamento, ou seja, um novo religador, localizado no final do seu trecho, no lugar da chave NA 17413, onde faz-se a manobra em casos de contingências, bem como a substituição do elo fusível em duas chaves fusíveis, localizadas em um dos ramais. Essas alterações estão melhor demonstradas na Tabela 14.

Tabela 14 - Alteração dos equipamentos de proteção do alimentador CZ

Nº Equipamento	Equipamento Atual	Alteração Proposta
2097	Chave Fusível Elo 40k	Chave Seccionadora de manobra
2090	Elo Fusível 10k	Elo Fusível 15k
2089	Elo Fusível 15k	Elo Fusível 25k
17413	Chave Seccionadora de Manobra	Religador Telecomandado

Fonte: Adaptado de Permissãoária “X”, 2019

Abaixo são apresentados os dados da parametrização do religador 2, já existente:

- Operações: uma instantânea e uma temporizada;
- Tempo de reset: 60 segundos;
- Tempo de religamento: 2 segundos;
- Curva para corrente de fase instantânea: 101;
- Curva para corrente de neutro instantânea: 101;
- Curva para corrente de fase temporizada: 137;
- Curva para corrente de neutro temporizado: 113;
- Corrente de disparo de fase: 100 A;
- Corrente de disparo de neutro 20 A;

3.8.3 Proposta de parametrização do novo RL em caso de contingências

Conforme já descrito neste capítulo, os dois alimentadores contêm uma chave manobra para a interligação em casos de alguma contingência. No lugar desta chave manobra será instalado um religador. Assim, quando ocorrer anomalias e um alimentador ter que suprir a demanda dos dois alimentadores, o religador irá atuar como uma proteção.

Observa-se que quando os dois alimentadores de distribuição tiverem energia fornecida pela fonte de JA, ou em caso contrário, quando a fonte de CZ está alimentando os dois trechos, este religador terá uma parametrização em sua configuração, a qual será apresentada a seguir. Tal configuração que será a mesma para os dois casos.

Abaixo estão apresentados os dados da parametrização do religador 17413:

- Operações: uma instantânea e uma temporizada;
- Tempo de reset: 30 segundos;
- Tempo de religamento: 2 segundos;
- Curva para corrente de fase instantânea: 101;
- Curva para corrente de neutro instantânea: 101;
- Curva para corrente de fase temporizada: 134;
- Curva para corrente de neutro temporizado: 113;
- Corrente de disparo de fase: 80 A;
- Corrente de disparo de neutro 18 A;

4 RESULTADOS E SIMULAÇÕES

No presente capítulo serão apresentados os resultados finais da proposta de mudanças no sistema de proteção dos alimentadores, suas simulações com as coordenações entre os equipamentos, bem como os gastos com a implementação comparando-se com os gastos que a empresa atualmente possui, em decorrência da falta de coordenação.

4.1 Coordenação e seletividade

De início, serão amostrados os gráficos das coordenações entre os equipamentos alterados e equipamentos novos instalados nos alimentadores.

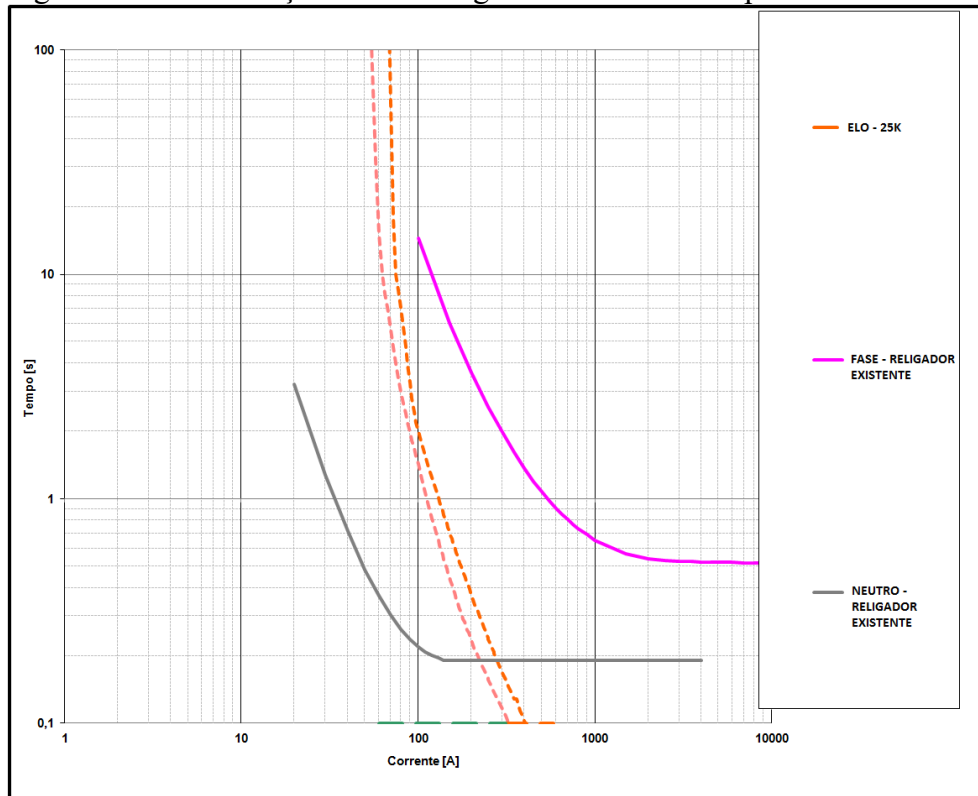
Ressalta-se que o programa utilizado para gerar as simulações das coordenações, consegue somente gerar a curva de um elo fusível, por conta disso todas as simulações serão feitas sempre com o primeiro elo fusível após os religadores.

4.1.1 Coordenação e seletividade dos alimentadores CZ e JA

Quando os dois alimentadores estão atuando de forma normal, sendo assim, cada alimentador terá que ter sua coordenação, entre religador e os elos fusíveis existentes nas redes, o religador localizado no ponto 17413, permanecera na função NA.

Pelo lado JA a coordenação será entre o religador localizado no início com os elos fusíveis que estão situados nas ramificações. Na Figura 24 é demonstrada a coordenação entre o religador 1701 e os elos protetores.

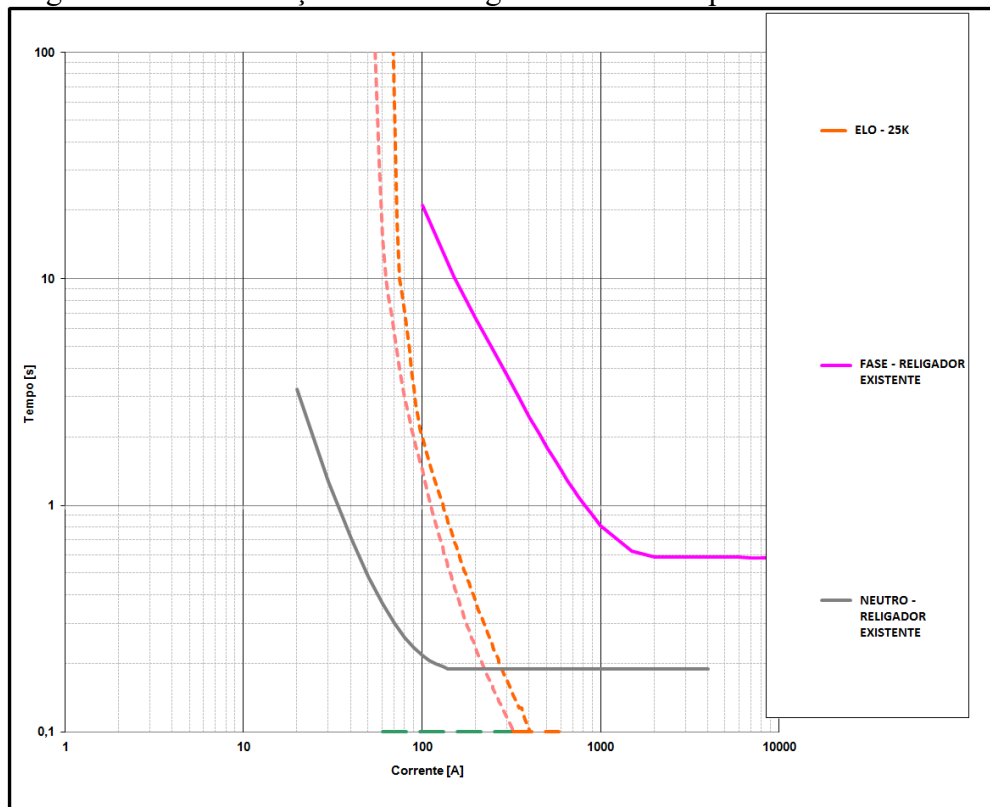
Figura 24 - Coordenação entre o religador 1701 e os elos protetores.



Observa-se que com as mudanças feitas pela proposta, tem coordenação entre o religador e primeiro elo a montante, que na situação anterior não existia entre os dois equipamentos.

Já para o lado do alimentador CZ também terá coordenação entre o religador localizado no início, com os elos fusíveis que estão situados nas ramificações, porém as parametrizações do religador são diferentes do alimentador JA. A seguir a Figura 25 demonstra a coordenação entre o religador 2 e os elos protetores.

Figura 25 - Coordenação entre o religador 2 e os elos protetores.



Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Observa-se que com as alterações propostas, passou-se a ter coordenação entre o religador e primeiro elo após (elo protetor), fato que na situação anterior não existia entre os dois equipamentos.

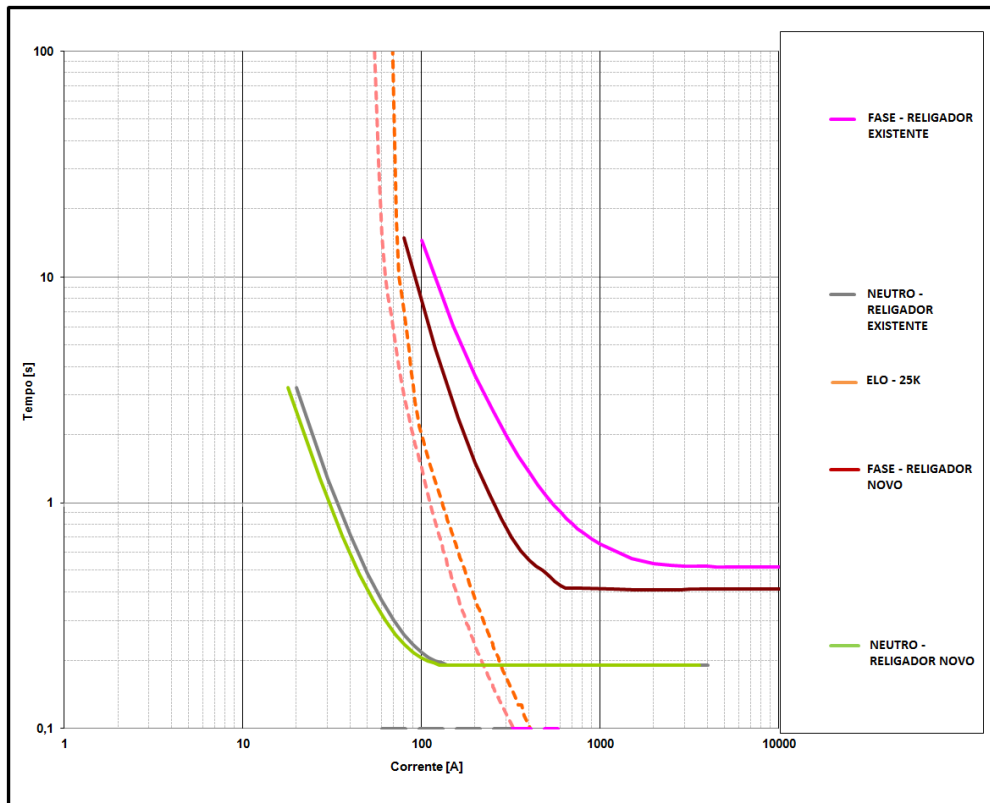
4.1.2 Coordenação e seletividade do alimentador JA na função fonte-carga

No presente item, será demonstrada a coordenação entre o religador 1701, já contendo suas novas parametrizações, com o novo religador no ponto 17413 e um elo de 25k.

Salienta-se que para estar correto, em primeiro caso, deve existir coordenação entre os dois religadores. Em segundo caso, precisa haver coordenação entre o religador localizado no ponto 1701 com os elos de 25k, tendo em vista que entre os dois religadores existem os elos que protegem as ramificações. Em terceiro caso, quando haverá a necessidade do alimentador JA fornecer energia para toda ou parte do alimentador CZ, entrará em ação o novo religador (17413), o qual deve possuir coordenação com os elos a montante.

Na Figura 26, é demonstrada a coordenação entre o religador 1701, com o novo religador localizado no ponto 17413, também, com um elo de 25k.

Figura 26 - Coordenação entre o religador existente no início, com o novo religador localizado no fim do alimentador e um elo de 25k.



Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Nota-se que graficamente a coordenação entre os dois religadores e o elo, para cada situação já citada anteriormente, estão em adequado sincronismo.

No Anexo B é demonstrado o diagrama unifilar do alimentador JA com as alterações simuladas, sendo a remoção da chave fusível com elo de valor de 40K (2104), por uma chave manobra, bem como a instalação do novo religador (17413) e a alteração do elo fusível no ramal (17412).

4.1.3 Coordenação e seletividade do alimentador CZ na função fonte-carga

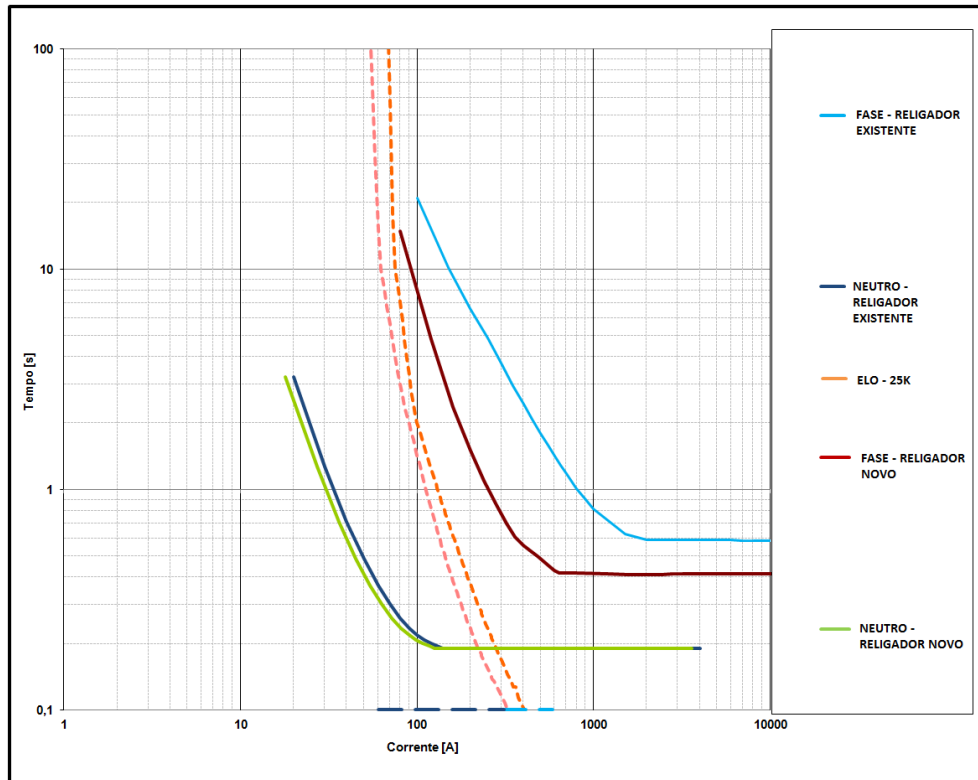
No presente item será demonstrada a coordenação entre o religador 2 contendo suas novas parametrizações, com o novo religador no ponto 17413 e um elo de 25k.

No primeiro caso, precisa existir coordenação entre os dois religadores. Deve haver coordenação entre o religador 2 com os elos de 25k, premissa para o segundo caso, tendo em vista que entre os dois religadores existe os elos que derivam para as ramificações. Quando haverá a necessidade de o alimentador CZ fornecer energia para toda ou parte do alimentador

JA, entrará em ação o novo religador (17413), o qual deve ter coordenação com os elos a montante, em terceiro caso.

Na Figura 27, é demonstrada a coordenação entre o religador 2, com o novo religador 17413, também, com um elo de 25k.

Figura 27 - Coordenação entre o religador 2, o novo religador 17413 e um elo de 25k.



Fonte: Adaptada de Permissionária “X”, 2019

Nota-se que graficamente a coordenação entre os dois religadores e o elo, para cada situação já citada anteriormente, estão em adequado sincronismo.

No Anexo B é demonstrado o diagrama unifilar do alimentador CZ com as alterações feitas no sistema, sendo a remoção da chave fusível com elo de valor de 40K, por uma chave manobra. Também, a localização da instalação de um novo RL, bem como a troca dos elos fusíveis no ramal.

4.2 Viabilidade econômica

No presente item, será avaliada a viabilidade econômica das propostas de melhorias a serem realizadas no sistema, bem como gastos já existentes da empresa por conta das interrupções.

Ressalta-se que não será considerado valores pagos pela empresa referente à violação dos limites de indicadores, porquanto inacessíveis estes valores, bem como o não faturamento de energia não distribuída.

4.2.1 Custo para a realização das alterações

Todos os valores de equipamentos novos, substituição de outros equipamentos, mão de obra e deslocamento de equipe de manutenção, são retirados e custeados da Permissionária “X”.

A Tabela 15 demonstra os valores necessários para as alterações.

Tabela 15 - Valores para as propostas de alterações

	Quantidade	Preços
Religador Novo	1	R\$ 43.094,21
Mão de Obra do RL		R\$ 5.883,44
Materiais e acessórios RL		R\$ 11.035,04
Instalação chave faca	2	R\$ 1.185,16
Substituição Elos Fusíveis	3	R\$ 174,00
Total		R\$ 61.371,85

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Analisando os valores acima descritos, percebe-se que o valor mais significativo é do religador novo, no valor de R\$ 43.094,21. Nesse valor, ainda soma-se o valor da mão de obra, no montante de R\$ 5.883,44, e materiais e acessórios do religador, sendo que no caso se encaixa toda a estrutura para sustentação do novo religador, no valor de R\$ 11.035,04, a substituição das duas chaves fusíveis por duas chaves seccionadoras de manobra, no valor de 1.185,16, no qual se enquadra todos os valores de mão de obra, materiais utilizados e equipamento novo. Também foi somado o valor da substituição dos 3 elos fusíveis, no valor

de 30,00, onde consta o valor dos elos e a mão de obra da substituição. Assim, totalizando um valor de R\$ 61.371,85 do investimento.

4.2.2 Custos de manutenção

Os gastos decorrentes das interrupções concentram-se em equipes para a manutenção e deslocamento, bem como materiais trocados. Gastos estes que são necessários para o reestabelecimento mais rápido possível da energia para os consumidores.

A Tabela 16 demonstra valores médios gastos com os itens mencionados acima, estes que são uma média calculada pela permissionária X para cada atendimento ocorrido com deslocamento de equipes.

Tabela 16 - Valores médios gastos com a manutenção dos alimentadores

	Preços	Quantidade	Preços
Mão de Obra (Equipes)	R\$ 72,00	2(horas)	R\$ 144,00
Deslocamento	R\$ 2,00	50 km	R\$ 100,00
Kit Materiais Trocados	R\$ 15,00	1	R\$ 15,00
Total			R\$ 259,00

Fonte: Adaptado de Permissionária “X”, 2019

Supondo que as melhorias realizadas resultem em uma redução mínima de 50% das ocorrências, ou seja, 85 ocorrências reduzidas. Assim contabilizando um valor total de R\$ 22.015,00. Comparando com os valores das tabelas 15 e 16, valores gastos para a implementação, o tempo de retorno do investimento seria de aproximadamente 2 anos e 10 meses, sem considerar remuneração devido a taxa de retorno do investimento.

Nota-se que a diminuição das interrupções modifica também os interesses econômicos da permissionária. A avaliação do desempenho da distribuidora dá-se por meio de toda a energia interrompida no decorrer dos desligamentos que ocorrem durante a apuração. Por ter relação com condições comerciais e técnicas, não é tão simples estimar uma taxa de redução para este indicador.

5 CONCLUSÃO

As redes de distribuição de energia elétrica possuem grande extensão e, portanto, possuem vários sistemas de proteção vinculados a ela. No entanto, em que pese a existência de todos esses mecanismos de proteção, as redes de distribuição, especialmente as do tipo aéreas rurais, não estão imunes a falhas, que podem ser permanentes ou transitórias.

As redes aéreas de distribuição podem ser classificadas como: isoladas, compactas e convencionais. Elas são instaladas de acordo com a necessidade do local. Frisa-se que os sistemas de distribuição são formados por alimentadores, que suprem cargas urbanas e rurais, estando sempre sujeitos a defeitos.

Os equipamentos de proteção que compõem as redes de distribuição, são projetados por meio de disjuntores, relés, religadores e elos fusíveis. Eles possuem como objetivo principal assegurar a desconexão de todo o sistema elétrico submetido a anormalidades.

Foi abordado acerca da ocorrência de curtos-circuitos (monofásico, bifásico e trifásico), entendendo-se que são as perturbações mais comuns e severas que ocorrem devido a ruptura do isolamento entre as fases ou entre fase e terra. Devem ser rapidamente eliminados sob pena de causar danos a alguns equipamentos que compõem a rede e a devida segurança de usuários.

Na metodologia de trabalho foram explorados dados de dois alimentadores rurais de redes de distribuição de média tensão, com uma análise dos indicadores de continuidade de serviço DEC e FEC, bem como foram analisados os dados das correntes de curto-circuito e de carga de determinados pontos do circuito em estudo.

Verificou-se que o alimentador JA está violando os limites de indicadores DEC e FEC, fato que não ocorre no alimentador CZ. Essa violação decorreu de contingências ou anomalias que ocorreram ao longo das redes de distribuição. Mas a maior elevação dos indicadores é quando essas falhas afetam a sua fonte, por conta da ausência de coordenação e seletividade para esse tipo de caso, quando a outra fonte precisa suprir a demanda do alimentador.

No mesmo capítulo foi analisada a situação atual dos equipamentos de proteção nos alimentadores CZ e JA, com a realização de simulações da coordenação desses equipamentos, bem como apresentadas propostas de melhorias conforme cada análise.

Nos resultados e discussões foram realizadas, primeiramente, simulações da coordenação do religador existente (já com as alterações sugeridas) com o elo de 25k, tanto para o alimentador CZ, como para o JA. Na sequência, foram realizadas simulações do

religador existente (já com as alterações sugeridas) com o novo religador e um elo de 25k, também, tanto para o alimentador CZ, como para o JA.

A partir dessas simulações feitas com base nas propostas de melhorias, concluiu-se que ocorreu a adequada coordenação e seletividade, proporcionando uma correta atuação do sistema de proteção quando necessário. Dessa forma, ocorrendo um problema no alimentador, cada equipamento de proteção irá atuar de acordo com os parâmetros estabelecidos, de modo a isolar o defeito e, assim, deixar o menor número possível de consumidores sem energia elétrica.

Diante do exposto, verifica-se que todas as propostas de melhorias podem ser realizadas, de modo a proporcionar viabilidade econômica para a empresa de distribuição de energia, para a qual surgirá um rápido retorno dos investimentos realizados.

5.1 Perspectivas futuras

Em oportunidade futura será analisada a questão da qualidade de energia entregue, bem como analisados os níveis de tensão que o consumidor estaria recebendo em suas instalações.

Outrossim, poderá ser analisado o desequilíbrio de corrente dos alimentadores, assim contribuindo para a coordenação e seletividade e minimizando o impacto nos indicadores regulados e análise econômica da energia não distribuída.

Ainda, poderá ser estudada a questão da rede elétrica inteligente ou, a chamada *Smart grid*, tornando o sistema cada vez mais confiável.

REFERÊNCIAS

- ALBANI, Catia Tatiane; COSTA, Lorene Goulart da. **Rede de distribuição aérea: comparativo técnico e econômico entre a rede convencional e a compacta na região de abrangência de uma concessionária de energia.** Curitiba: UTFPR, 2017.
- ANEEL. Prodlist. Módulo 1. Distrito Federal, 2016.
- _____. Resolução Normativa nº 794. Distrito Federal, 2017.
- _____. Prodlist. Módulo 8. Distrito Federal, 2018.
- ARAÚJO, Carlos André S. **Proteção de sistemas elétricos.** 2. Ed. Interciência, 2005.
- BARROS, Benjamin Ferreira de; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo Luis. **Geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica: controle e processos industriais.** São Paulo: Érica, 2014.
- BARROS, Benjamim Ferreira de et al. **Sistema elétrico de potência SEP: guia prático: conceitos, análises e aplicações de segurança da NR-10.** São Paulo: Érica, 2014.
- BERNADON, Daniel Pinheiro. **Novos métodos para reconfiguração das redes de distribuição a partir de algoritmos de tomadas de decisão multicriteriais.** Santa Maria: UFSM, 2007.
- BERNADON, Daniel Pinheiro et al. **Sistemas de distribuição no contexto das redes elétricas inteligentes: uma abordagem para reconfiguração de redes.** Santa Maria: AGEPOC, 2015.
- CAMPITELLI, Eduardo Moreti. **Análises e estudos para a locação e ajustes de dispositivos de proteção em redes de média tensão de energia elétrica com geração distribuída.** Ilha Solteira: UNESP, 2007.
- COELHO, Vilson Luiz. **Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- CPFL. **GED 120: Projetos de Redes Aéreas de Distribuição Rural.** São Paulo, 2016.
- _____. **GED 2912: Proteção de Redes Aéreas de Distribuição - Sobrecorrente.** São Paulo, 2016.
- _____. **GED 926: Chave Fusível Classes 15 e 24.2 kV-300A.** São Paulo, 2017.
- KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de; ROBBA, Ernesto João. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.
- KINDERMANN, Geraldo. **Curto-circuito.** 2. Ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

LEDESMA, Jorge Xavier Giménez. **Uma metodologia para análise da coordenação e seletividade da proteção de sistemas de distribuição.** Juiz de Fora: UFJF, 2012.

LEME, Daniel Maciel et al. **Sistema de Proteção da Rede De Distribuição de Energia Elétrica.** Itatiba: Universidade São Francisco, 2013.

MAIA, Reinaldo Moreira. **Caracterização das Variações de Tensão Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia.** Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Rio de Janeiro: LTC, 2014.

OLIVEIRA, Carlos César Barioni et al. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2014.

PARADELO JUNIOR, Romildo de Campos. **Proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição de energia elétrica através de abordagem probabilística.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2006.

PINTO, Milton de Oliveira. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados.** Rio de Janeiro: LTC, 2014.

RAMOS, Maicon Jaderson Silveira. **Metodologia para análise da coordenação e seletividade de dispositivos de proteção durante reconfigurações de redes de distribuição.** Santa Maria: UFSM, 2014.

RIBEIRO, André Luis. **Benefícios da rede de distribuição aérea compacta 15KV.** Itatiba: Universidade São Francisco, 2008.

SANTOS, Ricardo Araújo dos. **Proteção contra sobrecorrentes em redes de distribuição aéreas de 13.8Kv: análise do desempenho do sistema atual e propostas para melhoria.** Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

SATO, Fujio; FREITAS, Walimir. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SCHIEFELBEIN, Bruna; WERNER, Lucas; RODRIGUES, Carlos Fabiano. **Trabalho sobre religadores, TC e TP.** Ibirubá: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, 2014.

SPERANDIO, Mauricio. **Planejamento da automação de sistemas de manobra em redes de distribuição.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

STEVENSON JUNIOR, Willian D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência.** São Paulo: McGraw-Hill, 1978.

VIANA FILHO, Josemar de Souza. **Coordenação e seletividade da proteção elétrica do terminal portuário do pecém com a entrada da carga da correia transportadora.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2010.

ANEXOS

ANEXO A – Diagrama Unifilar da Atual Proteção da Rede JA

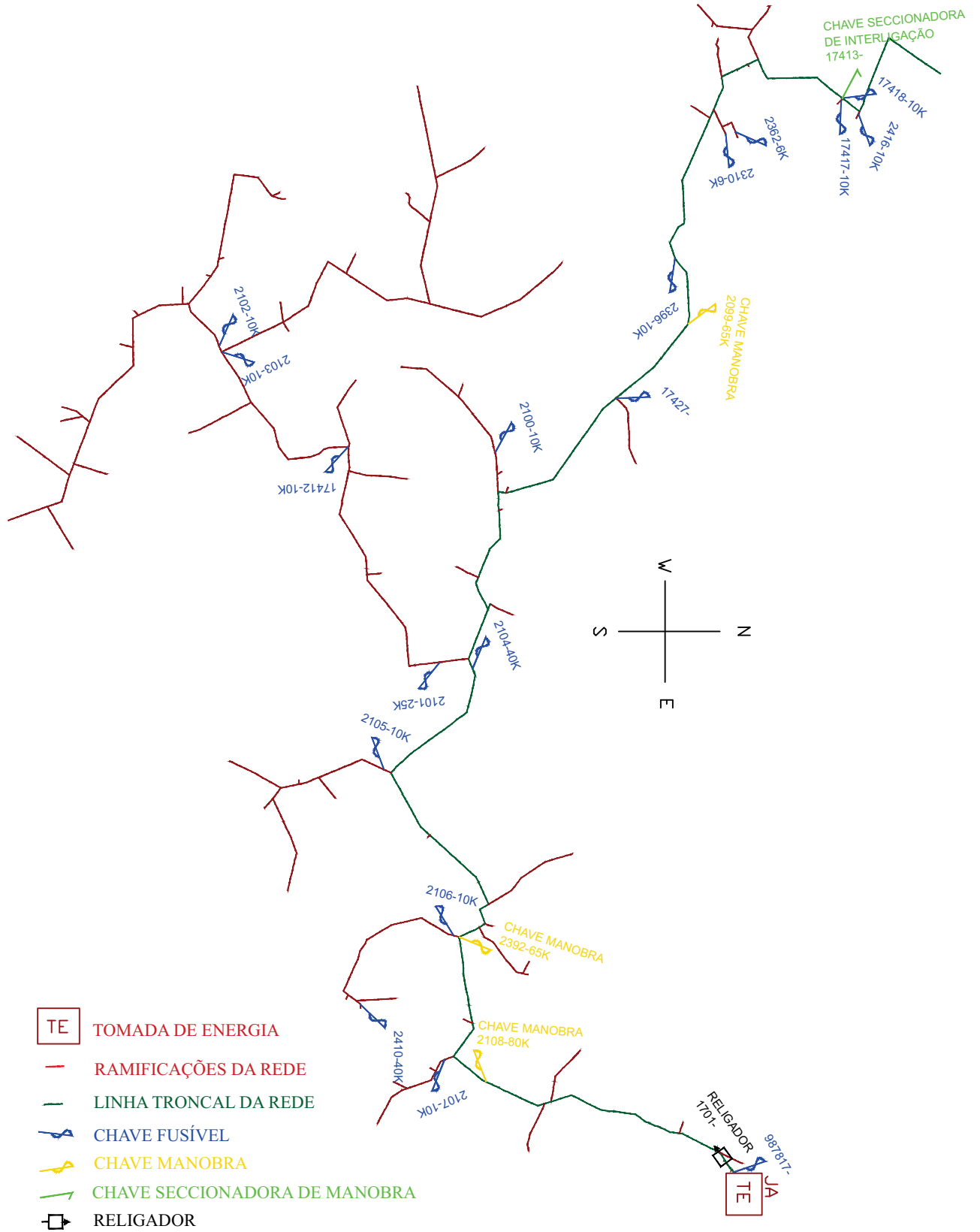
ANEXO B – Diagrama Unifilar da Atual Proteção da Rede CZ

ANEXO C – Diagrama Unifilar da Proteção da Rede JA com Propostas de Alterações Realizadas

ANEXO D - Diagrama Unifilar da Proteção da Rede CZ com Propostas de Alterações Realizadas

ANEXO E – Tabela de Coordenação e seletividade dos elos fusíveis do tipo K

ANEXO A - Diagrama Unifilar da Atual Proteção do Alimentador JA



ANEXO C - Diagrama Unifilar da Proteção do Alimentador JA com Proposta de Alteração Realizadas

