

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LAURA MACHADO CEZIMBRA

**ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DE RELIGADORES E FUSÍVEIS
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

**SÃO LEOPOLDO
2018**

LAURA MACHADO CEZIMBRA

**ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DE RELIGADORES E FUSÍVEIS
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica, pelo Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo Pereira

São Leopoldo

2018

Aos meus pais, por todo o amor e carinho que sempre me
deram.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Regina Machado Cezimbra e Antônio Carlos Batista Cezimbra, pela educação, incentivo e esforço para que eu pudesse realizar meus sonhos. Não tenho como mensurar meu amor por vocês.

Em segundo lugar, agradeço a Adriellen, pelo apoio e pela paciência em meus momentos de estresse, compreensão quando eu mais precisava, e alegrias compartilhadas.

Por fim, agradeço ao meu orientador, professor Dr. Paulo Ricardo Pereira, pelas orientações, pela amizade e por ter sido meu guia durante o curso de engenharia elétrica.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará a seu tamanho original”.

(Albert Einstein)

RESUMO

De modo a manter o fornecimento de energia o mais contínuo possível, perante às ocorrências de faltas passíveis de acontecer, o sistema de proteção de uma rede elétrica precisa estar coordenado e seletivo adequadamente conforme os equipamentos que o compõe. Com isso, o presente trabalho visa realizar o estudo de coordenação e seletividade através de análises das curvas de atuação de dois principais dispositivos de proteção de uma rede de distribuição de energia: o religador e o elo-fusível. Para tanto, foram abordados os critérios e premissas que as bibliografias apresentam como base para se realizar os ajustes desses equipamentos de modo a tentar garantir que estejam coordenados entre si. Também foram analisadas as características da rede, assim como, as causas de interrupção de energia e o quanto essas informações influenciam na atuação dos dispositivos de proteção na ocorrência de tipos diferentes de curto-circuito. Como auxílio, foi utilizado o *software* PSLDMS onde ocorreram as simulações de contingências, e as análises dos coordenogramas de proteção da rede. Os resultados das simulações apresentam as curvas de atuação dos equipamentos em estudo, resultantes dos ajustes realizados conforme as necessidades perante as contingências aplicadas. Para a análise dos elos-fusíveis, são destacados os casos mais relevantes para o estudo, demonstrando as possibilidades conforme as características da zona de proteção do elo. Para a análise do religador, são mostrados os resultados para suas curvas lentas de fase e de neutro, e para suas curvas rápidas de fase e de neutro, em relação a elos-fusíveis estratégicos da rede escolhida.

Palavras-chave: Coordenação e seletividade, redes aéreas de distribuição, religador, elo-fusível, PSL DMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de distribuição radial	18
Figura 2 – Componentes de um curto circuito assimétrico.....	21
Figura 3 – Tipos de curto-circuito	22
Figura 4 - Teorema de Fortescue.....	23
Figura 5 – Elo-fusível	25
Figura 6 – Curvas de operação do elo-fusível tipo K.....	26
Figura 7 – Religador automático	27
Figura 8 – Curva de operação de um religador Cooper	28
Figura 9 – Zonas de proteção	29
Figura 10 – Disposição de elo-fusível protetor e protegido	31
Figura 11 – Curva de coordenação fusível-fusível	33
Figura 12 – Disposição dos equipamentos religador e elos-fusíveis.....	37
Figura 13 – Coordenação típica do arranjo religador-fusível.....	37
Figura 14 - Metodologia desenvolvida.....	39
Figura 15 - Diagrama unifilar da proteção e a rede ao qual corresponde	40
Figura 16 - Diagrama tabular do PSL DMS.....	41
Figura 17 - Coordenograma demonstrando a faixa de 200 ms	43
Figura 18 - Campo de ajustes do religador	45
Figura 19 - Características do trecho do elo-fusível	46
Figura 20 - Características do trecho do religador	46
Figura 21 - Planilha de componentes simétricas.....	46
Figura 22 - Tipos de curvas de operação do religador	47
Figura 23 - Ajuste inicial religador e coordenograma resultante.....	48
Figura 24 - Coordenação religador-fusível	48
Figura 25 – Movimentando a curva de operação do religador	49
Figura 26 - Alimentador 18 da subestação CAM-P de Camaquã.....	50
Figura 27 - Elos-fusíveis destacados durante a análise	54
Figura 28 - Curva de atuação do Elo 1 (10K) para o mínimo e máximo curto-circuito	54
Figura 29 - Curva de atuação do Elo 10 (10K) para o mínimo e máximo curto-circuito	56

Figura 30 - Curva de atuação do Elo 10 (15K) para o mínimo e máximo curto-circuito	56
Figura 31 - Curva de atuação do Elo 43 (10K) para o mínimo e máximo curto-circuito	57
Figura 32 - Diagramas unifilares de proteção Elos 12 e 13	58
Figura 33 - Curvas de atuação dos Elos 12 e 11 para o mínimo e máximo curto-circuito	58
Figura 34 - Curvas de atuação dos Elos 13 e 11 para o mínimo e máximo curto-circuito	59
Figura 35 - Tempos de atuação dos Elos 11, 12 e 13.....	60
Figura 36 - Curvas de atuação dos Elos 12 e 11 para o mínimo e máximo curto-circuito	61
Figura 37 - Curvas de atuação dos Elos 13 e 11 para o mínimo e máximo curto-circuito	61
Figura 38 - Tempos de atuação Elos 12 e 11.....	62
Figura 39 - Tempos de atuação Elos 13 e 11.....	62
Figura 40 - Diagramas unifilares de proteção dos Elos 47, 48 e 49.....	63
Figura 41 - Curva de atuação do Elo 47 (10K) para o mínimo e máximo curto-circuito	64
Figura 42 - Curvas de atuação dos Elo 49, 46 e 44 para o mínimo e máximo curto-circuito	65
Figura 43 - Tempos de atuação dos Elos 49, 46 e 44.....	65
Figura 44 - Mínimo curto-circuito monofásico e bifásico	68
Figura 45 - Planilha componentes simétricas.....	68
Figura 46 - Máximo curto-circuito monofásico e trifásico	69
Figura 47 - Ajustes iniciais e curva de operação rápida	70
Figura 48 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para a curva rápida.....	71
Figura 49 – Ajustes para a curva rápida de fase.....	71
Figura 50 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para o mínimo curto-circuito	72
Figura 51 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para o máximo curto-circuito	72
Figura 52 - Ajustes para a curvas lenta de fase	73

Figura 53 - Coordenograma religador-fusível, Elo 44 e 50, para o mínimo curto-circuito	74
Figura 54 - Coordenograma religador-fusível, Elo 44 e 50, para o máximo curto-circuito	74
Figura 55 - Ajustes para a curva rápida de neutro	75
Figura 56 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para o mínimo curto-circuito	76
Figura 57 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para o máximo curto-circuito	76
Figura 58 – Ajustes para a curva lenta de neutro	77
Figura 59 - Coordenograma religador-fusível, Elo 44 e 50, para o mínimo curto-circuito	77
Figura 60 - Coordenograma religador-fusível, Elo 44 e 50, para o máximo curto-circuito	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequência de faltas.....	22
Tabela 2 – Valores de Elos-fusíveis tipo K para coordenar.....	33
Tabela 3 – Fator de multiplicação	36
Tabela 4 - Características da rede	51
Tabela 5 - Parâmetros elétrico da rede	51
Tabela 6 - Características consideradas para a análise.....	52
Tabela 7 - Elos-fusíveis analisados.....	52
Tabela 8 - Coordenação dos tempos dos Elos 12 e 11.....	63
Tabela 9 - Coordenação dos tempos dos Elos 13 e 11.....	63
Tabela 10 - Coordenação para os tempos dos Elos 49 e 46	66
Tabela 11 - Coordenação para os tempos dos Elos 46 e 44	66
Tabela 12 - Resultado da análise dos elos-fusíveis	66
Tabela 13 - Ajustes calculados.....	67

LISTA DE SIGLAS

AL	Alimentador
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora
DMIC	Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora
FEC	Frequência Equivale de Interrupção
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>Inrush</i>	Corrente de energização de transformadores
MT	Média Tensão
<i>Pickup</i>	Corrente de Disparo do Religador
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SEP	Sistema Elétrico de Potência
vs	Versus

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	16
2.1 Estado da arte.....	16
2.2 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica de Média Tensão.....	18
2.3 Falhas	19
2.3.1 Corrente de Curto-Circuito	21
2.3.2 Componentes da corrente de curto-circuito.....	23
2.4 Dispositivos de proteção.....	24
2.4.1 Elos-fusíveis	24
2.4.2 Religador	26
3 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE	29
3.1 Critérios de Coordenação e Seletividade.....	30
3.1.1 Critérios de seleção de elos-fusíveis	30
3.1.2 Critérios de coordenação fusível-fusível.....	31
3.1.3 Critérios de seleção do religador.....	34
3.1.4 Ajustes do Religador	34
3.1.5 Critérios de coordenação religador-fusível	36
4 METODOLOGIA	39
4.1 Seleção da rede	39
4.2 Análise da topologia da rede.....	40
4.3 Levantamento e Coleta de dados	41
4.4 Definição de premissas	41
4.4.1 Premissas elos-fusíveis.....	42
4.4.2 Premissas religador.....	43
4.5 Análise elos-fusíveis	44
4.6 Análise religadores	44
5 ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	50
5.1 Rede selecionada	50
5.2 Análise elos-fusíveis	53
5.3 Análise Religador	67
5.3.1 Curvas rápidas de fase.....	69
5.3.2 Curvas lentas de fase.....	73

5.3.3 Curvas rápidas de neutro	75
5.3.4 Curvas lentas de neutro	77
6 CONCLUSÕES	79
6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros.....	81
REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é tida como serviço público ou privado essencial à vida humana, repercute, pois, não só nas condições básicas da vida digna, como no desenvolvimento econômico de uma sociedade e de uma determinada região. Atento a isso, tem-se que o amplo acesso à energia elétrica é indispensável para propiciar condições básicas de qualidade de vida, desenvolvimento social e econômico à população.

O SEP – Sistema Elétrico de Potência é o responsável pela geração, transmissão, e distribuição da energia elétrica. De modo geral, usualmente no Brasil, a energia elétrica tem sua origem em usinas hidrelétricas, como Itaipu, de onde, a partir da transmissão, que compete níveis de tensão maior ou igual a 230 kV, conduz a energia para grandes centros de consumo. Na distribuição, onde ocorre a redução da tensão, a níveis de tensão normalmente entre 13,8 kV e 22 kV, as distribuidoras de energia elétrica, com base na legislação regulatória emanada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), repassam a energia por meio de cabos isolados, através de linhas de rede até os consumidores.

Na área de desenvolvimento e evolução tecnológica do SEP, existem muitas pesquisas de trabalhos sendo realizados com o propósito de melhorar o sistema elétrico em todo seu âmbito. O objetivo de conseguir um fornecimento de energia cada vez mais ininterrupto requer mais esforço por parte das concessionárias em buscar soluções automatizadas e confiáveis. Isso se deve a crescente necessidade de realizar melhorias de qualidade nos sistemas os quais precisam atender as normativas e padronizações estabelecidas pela ANEEL e pelo PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional.

Nesse cenário, o sistema de proteção tem grande importância para o funcionamento operacional e contínuo de uma rede. Com as diversas perturbações as quais podem ser submetidas, se torna necessário um estudo de proteção eficaz que seja capaz de fornecer confiabilidade, diminuir os danos de falhas, e consequentemente os riscos ao sistema elétrico.

O estudo da proteção é regido por terminologias que serão aprofundadas ao longo deste trabalho, porém, há algumas que precisam ser conceituadas desde o início para que haja entendimento do que está sendo desenvolvido. Filosofia de proteção é a técnica que cada um, seja pessoa física ou uma empresa, possui para

selecionar, coordenar, ajustar e aplicar os vários dispositivos de proteção a um sistema elétrico. Sensibilidade é o mínimo valor para o qual um dispositivo de proteção entra em operação. (CAMINHA, 1977). Coordenação é quando os dispositivos de um sistema possuem uma ordem correta de atuação que tenha sido pré-definida, ou seja, os tempos dos equipamentos para que eles entrem em operação, são ajustados de forma combinada entre si para que haja uma sequência de atuação. E seletividade é a capacidade do dispositivo de proteção que ao atuar desligue somente a parte com defeito. (FRANÇA, 2014).

Dentro da proteção, para se obter um sistema elétrico mais confiável, é necessário que os dispositivos sejam seletivos e estejam coordenados entre si. O estudo de coordenação e seletividade de uma rede tem como objetivo tentar garantir a configuração mais adequada em relação aos tempos de atuação das proteções da rede. Em um sistema bem coordenado consegue-se evitar a atuação errônea de equipamentos de proteção, e que um número maior de consumidores fiquem desenergizados.

Para redes de distribuição aéreas de média tensão (MT), é usual a aplicação de elos-fusíveis e religadores como arranjo de proteção. O elo-fusível é um meio econômico de obter seletividade em casos de faltas ocorridas no trecho o qual está protegendo. O religador é um meio de evitar que se perca elos-fusíveis e se desenergize consumidores para defeitos transitórios, ou seja, que somem antes de causar algum dano ao sistema. Mas para que esses dispositivos alcancem seus objetivos é preciso que haja coordenação entre suas curvas de atuação.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para se realizar o estudo de coordenação e seletividade entre religadores e elos-fusíveis em redes aéreas de distribuição. Serão realizadas análises verificando tipos de contingências, assim como as ocorrências de faltas na rede em estudo. Com isso, também se analisa a necessidade dos elos-fusíveis conforme as características dos ramais onde estão instalados.

Este documento possui como estrutura os seguintes capítulos:

- a) Capítulo 2 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS: são apresentados conceitos teóricos sobre o que compõe um sistema de proteção de redes de distribuição de MT, assim como o que provoca sua atuação como as faltas e correntes de curto-circuito.

- b) Capítulo 3 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE: são demonstrados os critérios que as bibliografias trazem para que se consiga uma coordenação e seletividade de equipamentos de proteção o mais adequado possível de acordo com a rede em estudo.
- c) Capítulo 4 METODOLOGIA: é apresentada a metodologia desenvolvida para realizar o objetivo deste trabalho, descrevendo os procedimentos e os tipos de análises necessárias.
- d) Capítulo 5 ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS: neste capítulo é descrito o sistema escolhido para aplicação da metodologia, junto com as suas condições operacionais. E os resultados do estudo, juntamente com o detalhamento das análises realizadas.
- e) Capítulo 6 CONCLUSÃO: são demonstradas as conclusões gerais e as conclusões mais específicas sobre o estudo caso.

2 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Para manter um serviço contínuo e de qualidade, todo sistema elétrico precisa de proteção, a qual necessita ser capaz de identificar distúrbios na rede. O seu principal objetivo é na ocorrência de alguma falta ele agir com rapidez, com a intenção de evitar riscos a vida humana, um menor dano aos equipamentos, e caso precise, desligando a menor parcela possível do sistema elétrico. (SILVEIRA, 2011).

Se fosse considerado uma proteção ideal, o que seria de fato vantajoso é que todos os dispositivos atuassem de forma imediata, retirando desse contexto os sistemas de temporização, e esperando como resultado que houvesse uma diminuição considerável dos defeitos, em um tempo reduzido. (PEREIRA, 2007). No entanto haveriam outros problemas, o sistema não estando coordenado e nem seletivo na ocorrência de alguma anomalia mais de um dispositivo poderia atuar sem necessidade, tendo como consequência interrupção do fornecimento de energia em uma parcela maior do sistema.

Sendo assim, na elaboração de um estudo de proteção, deve-se definir os ajustes de sensibilidade dos dispositivos de modo a oferecer coordenação e seletividade aos equipamentos e proteção ao sistema. (LEDESMA, 2012). Entre as funções da proteção em uma rede elétrica destaca-se também a de passar informações básicas aos responsáveis pela operação da rede para que os ajude a identificar onde aconteceu a falta e, se necessário terem que agir, ajudar também na recuperação da rede. (MAMEDE FILHO; MAMADE, 2011).

Por esses motivos, estudos e pesquisas na área de proteção, têm grande importância para o sistema elétrico mundial, pois a proteção de um sistema é a parte responsável por toda a segurança, tanto da parte operacional de uma rede quanto do que compõe o que está a sua volta.

2.1 Estado da arte

Em LEDESMA (2012) é desenvolvida uma metodologia para análise da coordenação e seletividade de um sistema elétrico de forma generalizada, e considerando as características comuns de um sistema de distribuição juntamente com os possíveis defeitos que podem ocorrer nesse sistema. O intuito é que essa análise seja feita de modo quantitativo, com o objetivo de que através de métodos

numéricos se possa chegar a uma coordenação de proteções de sobrecorrentes mais efetiva. Além disso, são modelados os diversos tipos de dispositivos de proteção como: elos-fusíveis, transformadores de correntes, relés e chaves.

Já em COMASSETO (2008), o trabalho desenvolvido é um pouco mais específico, ele nos descreve um sistema que auxilia principalmente em análises de redes de distribuição, nos estudos de coordenação e seletividade, convindo esses resultados como embasamento para ajustes de dispositivos de proteção reais. Para tal, COMASSETO (2008) nos traz diversos algoritmos de otimização, que ao todo, compuseram o *software* desenvolvido.

PEREIRA (2007) também desenvolveu uma ferramenta computacional de análise de coordenação e seletividade, porém, seu diferencial é que esse *software* serve tanto para sistemas de distribuição já existentes quanto para sistemas ainda em fase de projeto, o que dispõe a possibilidade de se poder padronizar os ajustes antes da rede entrar em operação, facilitando o trabalho e economizando tempo de parametrização de dispositivos.

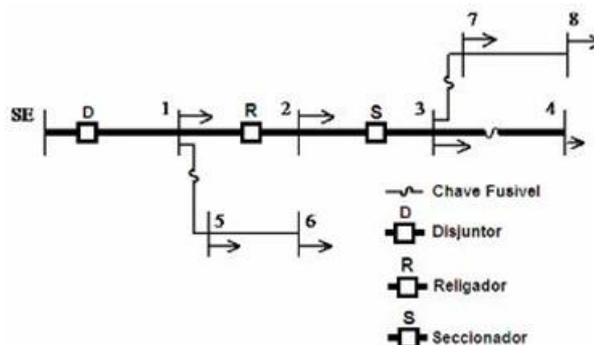
Esses são trabalhos direcionados para estudos de coordenação aplicados a uma rede de distribuição como um todo. Porém, SILVEIRA (2011) apresenta um trabalho dirigido para grupos de ajustes de relés digitais. Cada sistema possui um tipo de topologia, que pode ser modificado quando é realizada alguma manobra na rede. Com base nisso, SILVEIRA (2011) desenvolveu uma ferramenta que é capaz de modificar o grupo de ajustes dos relés digitais de uma rede, quando essa tem sua topologia modificada, adequando-os então à nova configuração. Sua metodologia foi baseada em Redes de Petri Coloridas, e seu sistema funciona mantendo um monitoramento da rede em tempo real, atuando de forma automática quando identifica uma mudança da topologia.

Os trabalhos apresentados foram desenvolvidos para agregarem tecnologia e praticidade às empresas de energia auxiliando, não só nas análises de proteção, mas também em alguns casos nos sistemas como um todo. Com base nessas revisões bibliográficas, percebe-se como é importante um sistema de proteção automatizado e confiável, tendo como consequência a diminuição das falhas de operação.

2.2 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica de Média Tensão

No que se refere a parcela do SEP que distribui energia diretamente aos consumidores, o sistema de distribuição de MT, podem existir dois tipos: o radial e o em anel. O anel é o mais aprimorado, seu objetivo é poder fornecer energia ao consumidor por mais de um caminho, podendo garantir assim o fornecimento de energia de forma mais confiável, entretanto, é o tipo de sistema mais caro. O radial é o mais simples e o mais comum, a energia flui da fonte até o cliente em apenas um sentido, sendo o mais barato, contudo, não é o mais comum somente pelo fato de seu custo, um sistema radial também facilita para a alocação das proteções da rede, já que a energia tem apenas um sentido, facilita coordenar as proteções entre si (ELETROBRÁS, 1982).

Figura 1 – Sistema de distribuição radial



Fonte: Elaborado pela autora.

Todavia, nos dias atuais, os órgãos reguladores têm solicitado cada vez mais eficiência no desempenho do sistema em fornecer energia, exigindo um serviço com mais qualidade e continuidade, o que se torna um problema para as concessionárias que operam nas redes de distribuição, sendo obrigadas a procurar novas estratégias de operação. (COMASSETO, 2008). Nesse contexto, começam a aparecer problemas para otimizar a rede, como: qual a alocação ótima para os equipamentos de proteção ou quais os melhores ajustes para a coordenação entre eles? (PILO et al, 2011).

O PRODIST, o Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica, determina os procedimentos relativos a qualidade de energia, estabelecendo referências a serem atendidas pelas distribuidoras que necessitam manter seus indicadores de qualidade dentro dos limites exigidos. Esse Módulo veio para substituir a antiga Resolução de número 024 de 27 de janeiro de 2000, da ANEEL, a qual enunciava o seguinte:

A continuidade da distribuição de energia elétrica deverá ser supervisionada, avaliada e controlada por meio de indicadores coletivos que expressam os valores vinculados aos conjuntos de unidades consumidoras, bem como indicadores individuais associados a cada unidade consumidora.

Tendo tudo isso em vista, as concessionárias estão investindo progressivamente em soluções tecnológicas para o sistema de proteção, pois, apesar do custo de investimento, enxergam essa ação com objetivos econômicos a médio e longo prazo, sabendo que assim se pode, (LEDESMA, 2012):

- Melhorar o fornecimento de energia;
- Diminuir as despesas com a manutenção corretiva;
- Melhorar os índices DEC e FEC;
- E melhorar os índices de DIC, FIC e DMIC.

onde:

DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

DIC – Duração de Interrupção por Unidade Consumidora

FIC – Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora

DMIC – Duração Máxima de Interrupção por Unidade consumidora

Todos esses indicadores impactam tanto as empresas de energia quanto principalmente aos consumidores, ou seja: menor o número de interrupções, menor o número de reclamações por parte dos clientes. Porém, mesmo com todas essas questões regulatórias, não se pode esquecer que a segurança sempre vem em primeiro lugar, e deve encabeçar os principais propósitos de um sistema de proteção. Não basta conseguir fornecer a energia elétrica ininterruptamente, é preciso que seja fornecida de maneira segura.

2.3 Faltas

A maioria dos acidentes de sistemas elétricos ocorrem em redes de MT. Isso se deve principalmente pelo fato de o sistema de distribuição de rede aérea ser completamente exposto ao tempo, sendo mais susceptível a ocorrência de defeitos. (KINDERMANN, 1997). São variados os tipos de faltas que podem ocorrer em sistemas elétricos, entre os mais possíveis, são citados alguns a seguir:

- Problemas mecânicos: ação da natureza, tais como, contatos de galhos de árvores decorrentes de temporais, e demais causas naturais;
- Problemas elétricos: podem ser ação da natureza ou devido a operação do sistema, como sobretensão, descargas atmosféricas, surtos de chaveamento;
- Problemas de manutenção: peças inadequadas na reposição ou substituição (não originais de fábrica, por exemplo), equipe não treinada adequadamente para a função exercida, falta de inspeção na rede;

As empresas mantêm um controle mensal e anual da ocorrência dessas faltas, utilizando esses dados para gerir índices de monitoramento de qualidade e continuidade de energia. Essas informações não são generalizadas para todos os sistemas de distribuição, cada rede possui suas próprias características de acordo com tipo de carga que atende. (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005). Redes rurais são mais susceptíveis a faltas oriundas de ação da natureza, como citado anteriormente, contatos de galhos a rede e até contatos de animais. Já redes urbanas, por serem localizadas nas cidades, são mais passíveis de ocorrer acidentes envolvendo ação humana, como exemplo, batidas de carros a postes. (KINDERMANN, 1997).

Quando essas faltas ocorrem, geralmente não há como saber de imediato, só é possível perceber ao detectar suas consequências. Com isso, para que se possa identifica-las, são considerados alguns critérios pelas concessionárias para a detecção, como elevação de corrente, elevação e redução de tensão, inversão do sentido da corrente, entre outros. (CAMINHA, 1977). Além de tudo, são imprevisíveis e causam transtorno às empresas de energia que necessitam estar sempre em alerta com a possibilidade de ocorrer alguma anomalia. Porém, conseqüentemente, por confiar no serviço prestado, os clientes são os principais prejudicados, pois sob o ponto de vista dos mesmos, o sistema elétrico sempre vai se manter estabilizado, com capacidade operacional constante. (SATO, 2005).

Conforme a maneira que acontece o restabelecimento do sistema após alguma ocorrência, ela pode ser identificada como temporária ou permanente. As faltas temporárias são caracterizadas por sumirem após a operação da proteção e o reestabelecimento de energia ocorrer de forma imediata e sem ação externa. Já as faltas permanentes são aquelas na qual exige reparos de ação humana, provocando interrupções distendidas para a recomposição do sistema. Com a abertura definitiva do disjuntor, a equipe de manutenção deverá se deslocar até o local aonde o defeito foi detectado, e então após o reparo, o sistema poderá ser restabelecido de modo que

os equipamentos de proteção estejam adequados para o caso de haver novas condições de falhas. (SILVEIRA, 2005).

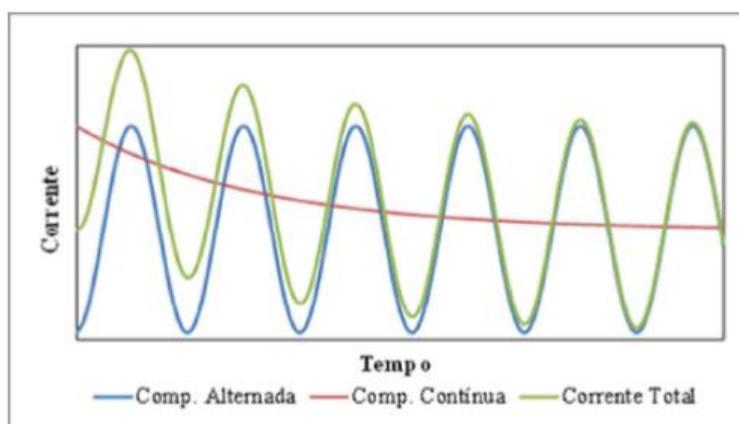
2.3.1 Corrente de Curto-Circuito

Ao acontecer, as falhas causam na rede um curto-circuito. Segundo Kindermann, 1997, em tese, a definição de curto-circuito é quando existem dois pontos ou mais com diferença de potencial elétrico entre eles, normalmente de baixa impedância, e acabam entrando em contato um com o outro. Esse contato pode causar na rede correntes com valores muitíssimos altos que excedem a capacidade térmica dos cabos e dos equipamentos podendo assim causar danos.

O elemento que propaga a corrente de curto-circuito é o gerador síncrono. É ele que supre a demanda de energia exigida pela carga mantendo os níveis de tensão dentro de uma faixa. Quando ocorre uma falta na rede, a impedância enxergada por ele cai drasticamente. (CEEE-D, 2008). Em consequência para tentar manter o sistema nos níveis exigidos para a operação, injeta na rede uma corrente altíssima que só se extinguirá quando a proteção atuar. A corrente de curto-circuito passa por três fases, inicia no subtransitório, passa para o transitório e deveria entrar em regime permanente, porém, essa não chega a acontecer se a proteção atuar. (RAMOS, 2011).

Durante o período transitório a corrente de curto-circuito é assimétrica, e, ao entrar no período de regime permanente, se torna simétrica. A corrente assimétrica é composta por uma parcela alternada e uma parcela contínua, que ao somar as duas têm-se a forma de onda da corrente resultante, como se pode ver na Figura 2.

Figura 2 – Componentes de um curto circuito assimétrico

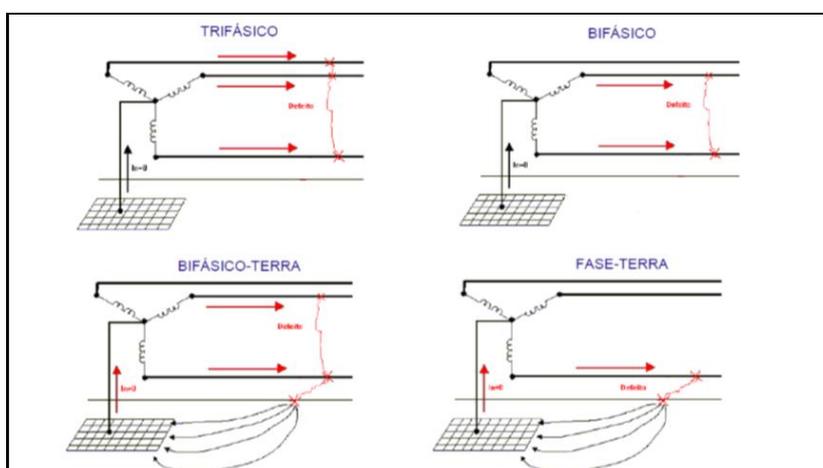


Fonte: PEREIRA (2017).

Há quatro tipos de curtos-circuitos possíveis de ocorrer em um sistema de distribuição de MT: monofásico ou fase-terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico. Sabe-se que uma rede de distribuição é composta por três fases, logo, quando há o mesmo valor de corrente nas três, significa que o sistema está equilibrado. Com isso, na ocorrência de um curto-circuito monofásico ou bifásico, acontece um desbalanceamento no sistema, já que as três fases já não possuem mais o mesmo valor de amplitude. O curto trifásico é o único que é tido como equilibrado, pois, considera-se que é passado o mesmo valor de corrente de curto nas três fases. (RAMOS, 2011).

Na Figuras 3 é ilustrado como cada um acontece.

Figura 3 – Tipos de curto-circuito



Fonte: PEREIRA (2017).

E na Tabela 1 é apresentado estatisticamente a frequência com a qual cada uma ocorre.

Tabela 1 - Frequência de faltas

	% de Ocorrências	Permanentes (%)	Transitórias (%)
Trifásica	2	95	5
Bifásica	11	70	30
Monofásica	79	20	80

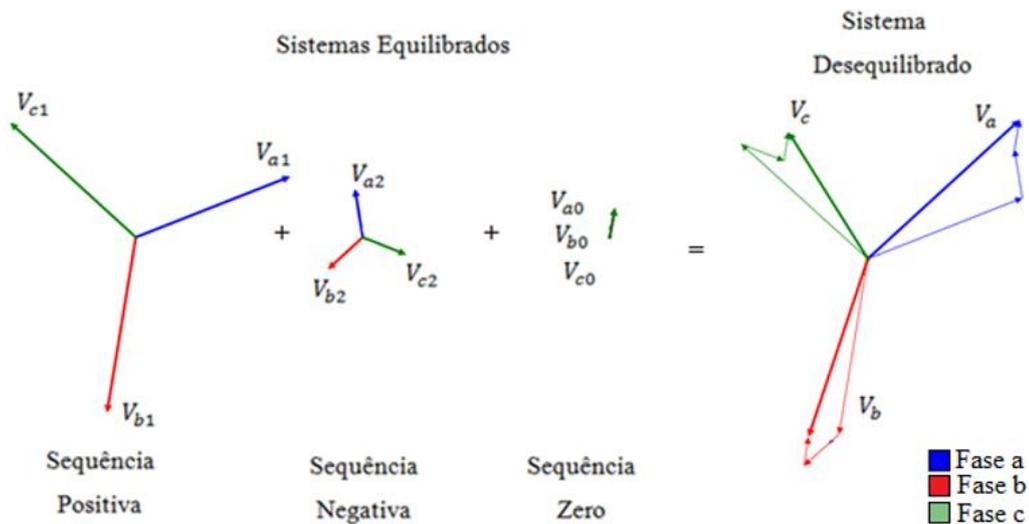
Fonte: Adaptado de SILVEIRA (2011).

2.3.2 Componentes da corrente de curto-circuito

Normalmente, correntes de curto-circuito acabam gerando desequilíbrio e assimetria em sistemas elétricos. Quando um sistema está desbalanceado, as três fases apresentam valores de amplitude, de tensão e corrente, diferentes entre si. Quando ele está assimétrico, significa que os ângulos de defasagem, também de tensão e corrente, diferem de 120° . Nessas condições, é difícil analisar os cálculos e simulações do defeito que possa ter ocorrido. Devido a isso, em 1915 Fortescue propôs uma ferramenta para resolver esse problema. (KINDERMANN, 1997).

O Teorema de Fortescue foi desenvolvido para sistemas polifásicos, mas é uma técnica comumente utilizada para analisar sistemas trifásicos em condições de desequilíbrio. Ele permite decompor um sinal trifásico em três componentes respectivamente simétricas e equilibradas: sendo uma de sequência positiva, uma de sequência negativa, e uma de sequência zero.

Figura 4 - Teorema de Fortescue



Fonte: PEREIRA (2017).

A sequência positiva é composta por três fasores de mesma amplitude e defasados em 120° entre si, com a mesma sequência de fase dos fasores originais. A sequência negativa é composta por três fasores de mesma amplitude e defasados em 120° entre si, com sequência de fase oposta à dos fasores originais. A sequência zero é composta por três fasores de mesma amplitude e mesmo ângulo, e com a mesma sequência de fase dos fasores originais. Como os três conjuntos são

decompostos de um sistema trifásico desequilibrado, a soma deles tem que resultar nesse mesmo sistema. (KINDERMANN, 1997).

2.4 Dispositivos de proteção

É a atuação dos dispositivos de proteção que pode impedir que uma rede ou equipamento seja danificado quando exposto a uma falta. É possível encontra-los em sistemas elétricos em geral e nesse trabalho será falado especificadamente sobre elos-fusíveis e religadores.

Tanto um quanto outro têm suas características próprias que determinam sua localização em uma rede de distribuição. Por exemplo, em MAMEDE FILHO e MAMEDE (2011) é recomendado que para início de ramais, o elo-fusível é um equipamento fundamental. Enquanto o religador pode ser um equipamento alternativo dependendo dos tipos de ocorrências em uma rede ou da importância da carga, sendo utilizado principalmente em áreas rurais, mas também como chaves de manobras telecomandadas (MAMEDE FILHO, 2011). Os dois juntos formam um dos principais arranjos de equipamentos de proteção aérea utilizados em redes de distribuição.

Nos itens a seguir descreve-se mais detalhadamente os dois dispositivos em estudo.

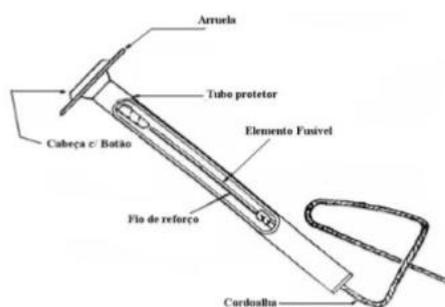
2.4.1 Elos-fusíveis

Os elos-fusíveis por terem um baixo custo, são os equipamentos utilizados com maior frequência nos sistemas de proteção das redes de distribuição tanto urbanas como rurais (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011). Além disso, apresentam um ótimo desempenho para a função que são designados, constituindo um ótimo custo benefício. É um dispositivo de proteção contra sobre corrente que possui por funcionalidade básica interromper a passagem da corrente elétrica quando essa que flui pelo fusível exceder um valor pré-determinado em um tempo estimado. (CEMIG, 1988).

Para exercer sua função, o elo-fusível possui um ligamento metálico que por ter um baixo ponto de fusão, se funde por efeito térmico com a passagem de um valor elevado de corrente elétrica, interrompendo assim a passagem da mesma (IEEE Std. 242, 2001). No entanto, ao fundir, ainda não se garante que houve a interrupção da

corrente elétrica no circuito, isso se deve pois em sistemas de média tensão, mesmo com o fusível aberto, em seus terminais ainda há um ambiente fortemente ionizado, podendo causar arco elétrico. Para evitar essa situação e assegurar que a corrente do fusível seja extinta, ele é encoberto por um tubo que ao ser queimado pelo arco libera substâncias desoinizantes. (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

Figura 5 – Elo-fusível



Fonte: COMASSETO (2008).

Devido ao modo como o fusível atua, o elo não pode ser reutilizado, além disso, é um equipamento monofásico, desse modo atuando em apenas uma fase, e tendo suas funções de detectar sobrecorrentes realizadas por um único dispositivo. (CEMIG, 1988).

Os tipos de elos-fusíveis existentes são variados, podendo ser divididos de acordo com suas características, aplicações e classes de tensão. Para serem utilizados, são escolhidos em função da curva tempo vs corrente, o que possibilita que sejam classificados nos grupos fusível tipo H, fusível tipo K, e fusível tipo T.

Os fusíveis tipo H são empregados para a proteção de transformadores de redes de distribuição devido ao seu tempo lento de atuação, pois dessa forma não operam para a corrente de *inrush* que ocorre durante a energização do transformador. Já os tipos K e tipo T, são destinados para a proteção de ramais de distribuição, sendo que um apresenta um tempo rápido de atuação e o outro um tempo lento, respectivamente, por isso são utilizados conforme a necessidade da proteção para o sistema. (MAMEDE FILHO, 2011).

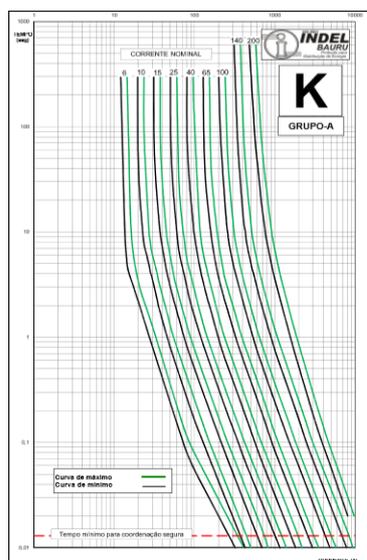
O tipo K, especificadamente, é classificado em dois tipos: elos preferenciais e não preferenciais. Isso acontece para ajudar a mostrar que apenas há coordenação entre os elos dentro do mesmo grupo. (MAMEDE FILHO, 2011).

Um outro ponto importante sobre elos-fusíveis são suas curvas de atuação que são caracterizadas por possuir um tempo inversamente proporcional à corrente

elétrica, comportando uma faixa de imprecisão. (IEEE Std. 242, 2001). Essas curvas são fornecidas em gráficos onde se pode ver o comportamento do elo em questão de tempo conforme o valor da corrente. E elas são fornecidas com quatro características diferentes. (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011):

- Curva de tempo vs corrente para o mínimo tempo de fusão: é a curva de menor tempo o qual o elo-fusível se funde, para um valor específico de corrente.
- Curva de tempo vs corrente para o máximo tempo de fusão: é a curva onde é acrescido um valor de corrente dado pelo fabricante, à curva de tempo mínimo de fusão, dando uma margem de tolerância para que o elo funda.
- Curva de tempo vs corrente total de interrupção do arco: é a curva onde é acrescido um valor de tempo, à curva máxima de fusão, e condiz com o tempo que consente a extinção completa do arco.
- Curva de tempo de curta duração vs corrente: é a curva com o tempo máximo, o qual, caso haja uma sobrecarga com um valor específico de corrente e que seja de curta duração, o elo não entre em fusão.

Figura 6 – Curvas de operação do elo-fusível tipo K



Fonte: Catálogo Indel Bauru.

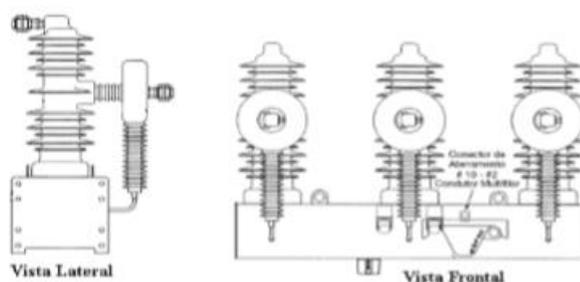
2.4.2 Religador

Os religadores mudaram muito ao longo do tempo, nos anos passados era muito utilizado religadores do tipo com bobina série. Porém, os sistemas elétricos

evoluíram de forma geral, e hoje em dia são utilizados religadores microprocessados, os quais são muito mais sofisticados possuindo recursos tecnológicos de proteção, medição e telecomunicação. Vieram com o conceito de *Smart Grid*, redes inteligentes agregadas com um alto nível de automação, que possui o objetivo de elevar consideravelmente a eficiência de operação do sistema. Mas, para tanto, trazem uma gama maior de parâmetros a serem configurados.

As principais funções de um religador automático é dar proteção contra sobrecorrentes e trazer confiabilidade ao sistema. (SILVEIRA, 2004). Ele entra em operação ao detectar uma corrente de curto-circuito, para então, desligar e tentar religar a rede novamente, em um número pré-determinado de vezes. Quando percebe um valor de sobrecorrente ao qual é sensível, interrompe a circulação dessa corrente abrindo seus contatos. Os contatos ficarão abertos durante o *tempo de religamento*, que é o nome dado para um tempo definido de espera antes da reenergização, para, caso o problema seja uma falta temporária, ela se elimine antes que o circuito seja religado. Se a falta for do tipo permanente, ele deverá repetir essa sequência consecutivamente o número de vezes que foi determinado, até que entre em estado de bloqueio e os contatos fiquem abertos definitivamente, podendo somente serem fechados de forma manual. (ELETROBRÁS, 1982).

Figura 7 – Religador automático



Fonte: COMASSETO (2008).

São apropriados para serem utilizados em redes aéreas de média tensão, e é um meio econômico de realizar seccionamentos em circuitos elétricos de distribuição. (SILVEIRA, 2004). Entre essas, pode-se apontar mais algumas das vantagens que o religador agrega ao sistema de proteção, tais como redução de danos aos condutores e transformadores, redução de queima de fusíveis, economia com a redução de serviços prestados manualmente, entre outros. (MAMEDE FILHO, 2011).

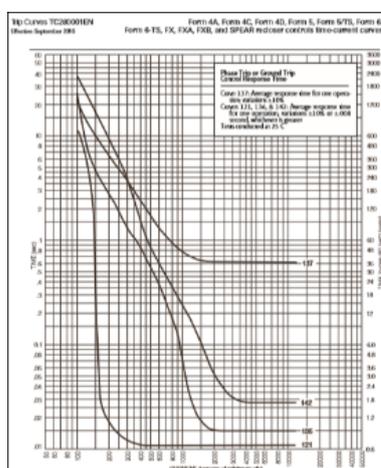
Quanto a operação de um religador, existem dois tipos que se referem ao sistema de temporização do equipamento, e que podem ser determinados conforme as características do sistema e a filosofia de proteção da rede ao qual ele está instalado. (ELETROBRÁS, 1982):

- Operações rápidas: são aplicadas normalmente para efeitos transitórios, com o objetivo de reduzir possíveis danos a rede, evitando que a energia seja interrompida por um longo tempo e que os elos-fusíveis a jusante, queimem.
- Operações lentas: é dado mais tempo para o sistema pensar e reagir a uma falta permanente, dando a possibilidade, se necessário, dos elos-fusíveis entre a falta e o religador, queimarem.

As sequências de operações dependem da filosofia de proteção do sistema podendo utilizar somente curvas rápidas ou somente curvas lentas e qualquer combinação entre elas dentro dos limites estabelecidos pela concessionária.

A atuação das curvas dessas operações é condicionada a dois ajustes principais, o para fase e o para neutro de modo garantir a sensibilidade a todos os tipos curto-circuito. Os religadores possuem tipos diversificados de curvas de atuação, as quais são padronizadas. Entretanto, com os parâmetros de temporização e os ajustes de corrente de disparo de fase e de neutro, podem ser modificadas resultando em ampla flexibilidade para realizar a coordenação com outros equipamentos de proteção da rede. (PEREIRA, 2007). Na Figura 8 são apresentadas algumas curvas padronizadas de religadores automáticos da série Cooper Power.

Figura 8 – Curva de operação de um religador Cooper



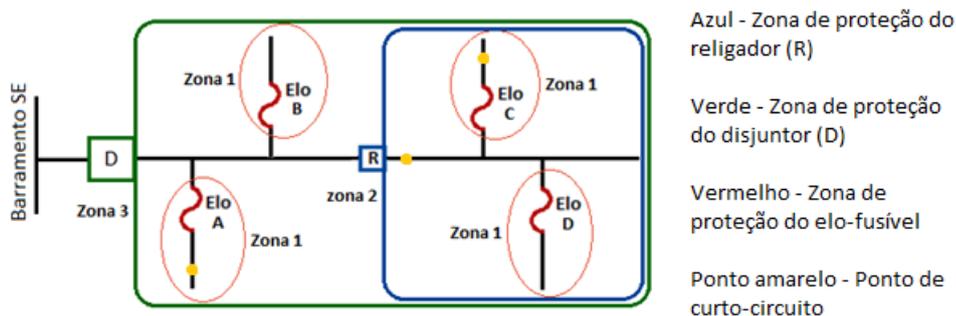
Fonte: Manual do Religador Cooper

3 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

Conforme SILVEIRA, coordenar um sistema de proteção é o processo pelo qual é exigida uma seletividade aos dispositivos de proteção, sendo essa baseada em critérios pré-estabelecidos. Esses critérios são utilizados como parâmetro para que se efetue ajustes aos equipamentos. E para tal, são necessárias informações do sistema como os níveis de curto-circuito e funcionalidades operacionais da rede e dos dispositivos. Na maioria das vezes é impossível estabelecer um único ajuste que aprecie todas as condições de contingências que a rede possa ser submetida, e que atenda aos critérios que serão mencionados nesse capítulo. (SATO, 2005).

Conforme a disposição dos equipamentos na rede, eles possuem uma determinada zona de proteção, que é a denominação que se dá para a região do sistema a qual está protegida por algum desses dispositivos. (CAMINHA, 1977). Como se pode ver na Figura 19, é possível que mais de uma zona de proteção, proteja o mesmo trecho de rede, tornando assim o sistema de proteção mais confiável. Entretanto, nessa condição é preciso definir em qual ordem as proteções das zonas que se sobrepõe, irão atuar para evitar que haja conflito entre esses equipamentos e mais trechos, além do necessário, sejam desligados.

Figura 9 – Zonas de proteção



Fonte: Elaborado pela autora.

A definição da ordem de atuação, determina a classificação do equipamento dentro do sistema de proteção. Explicando a Figura 9, as zonas 1 são proteções principais de seus ramos. Se ocorrer um curto-circuito no ponto amarelo na zona de proteção do Elo C, o religador é a primeira proteção de retaguarda caso a proteção principal entre em falha. Se o curto-circuito for no ponto amarelo na frente do religador, este agora é a proteção principal, sendo o disjuntor a sua proteção de retaguarda. Por fim, o curto-circuito sendo na zona de proteção do Elo A, fora da zona de proteção do

religador, o disjuntor é a proteção direta de retaguarda do elo-fusível. De modo a assegurar que os defeitos na rede sempre sejam detectados e constatar que toda a rede elétrica está protegida, é preciso que todos os elementos desse sistema estejam dentro de uma das zonas de proteção.

3.1 Critérios de Coordenação e Seletividade

Sabe-se que cada sistema elétrico é diferente e possui suas próprias peculiaridades, apesar disso, muitas referências bibliográficas como ELETROBRÁS (1982), COMASSETO (2008), MAMEDE (2011) nos trazem uma série de critérios importantes que deve-se tentar seguir para se obter uma coordenação adequada entre os equipamentos de proteção e com o menor risco possível de falha. Esses critérios são direcionados para sistemas generalizados e possuem o objetivo de ajudar no correto funcionamento desses equipamentos e principalmente na confiabilidade deles. De nada adianta ter um sistema de proteção que não é confiável.

Esses critérios não são regras obrigatórias, podendo ser modificados conforme a filosofia de proteção de cada sistema. Como dito no parágrafo anterior, uma rede difere da outra, mas é importante ter um parâmetro que já foi testado e que tem um bom resultado. Este trabalho foi baseado nesses critérios e os conceitos que eles nos trazem.

Não são os mesmos critérios para todos dispositivos de proteção, cada um tem sua ordem de critérios a atender, tanto para sua aplicação quanto também para sua coordenação.

3.1.1 Critérios de seleção de elos-fusíveis

Para a seleção do elo-fusível, esse fica subordinado a caracterização das condições elétricas, no ponto onde será instalado, ser compatível com a caracterização própria do elo-fusível que se pretende colocar. Para que isso aconteça, segue alguns critérios que devem ser respeitados (ELETROBRÁS, 1982):

- Crescimento de carga: dimensionar o elo-fusível considerando um aumento de carga para os próximos anos (normalmente de 3 a 5 anos).
- Manobras de cargas: dimensionar o elo-fusível, prevendo que haja transferência de cargas.

- Tensão Nominal: a tensão nominal do elo deve ser, no mínimo, compatível com a classe de tensão do sistema onde será instalado.
- Corrente nominal: a corrente nominal do elo deve ser igual ou maior que 150% do valor da corrente máxima de carga no ponto considerado.
- Capacidade de Interrupção: tem que ser maior do que a máxima corrente de curto-circuito no ponto de instalação.
- Corrente de curto-circuito mínimo fase-terra: a corrente nominal do elo-fusível deverá ser, no máximo, um quarto da corrente de curto circuito fase-terra mínimo no fim do trecho para o qual ele é proteção de retaguarda.

$$1,5 \times I_c \leq I_{elo} \leq \frac{1}{4} I_{cc} \quad (3.1)$$

onde:

I_{elo} corrente nominal do elo-fusível [A]

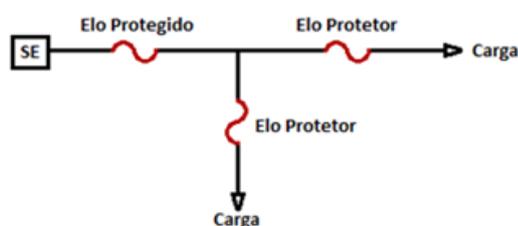
I_c corrente máxima onde o elo está instalado [A]

I_{cc} corrente curto-circuito fase-terra mínimo [A]

3.1.2 Critérios de coordenação fusível-fusível

Os elo-fusíveis são amplamente utilizados na proteção de ramais em sistemas de distribuição devido ao seu custo de operação ser reduzido (COMASSETO, 2008), e para ser realizada a coordenação entre eles, também existem alguns critérios que devem ser seguidos. Os conceitos de proteção principal e proteção de retaguarda já foram abordados neste trabalho, a seguir são mostradas essas definições aplicadas à fusível-fusível, como visto na Figura 10:

Figura 10 – Disposição de elo-fusível protetor e protegido



Fonte: Elaborado pela autora.

Elo-fusível protetor é o elo mais próximo da carga e que deve entrar em operação para todo curto-circuito que ocorrer em sua zona de proteção em um tempo rápido o suficiente antes que o elo protegido atue ou seja danificado. Elo-fusível

protegido é o elo mais próximo da fonte que está sendo protegido, por tanto, seu tempo de atuação precisa ser mais lento para todo valor de curto circuito dentro da zona de proteção do elo protetor.

Na Figura 10 mostra o arranjo de três elos-fusíveis a serem coordenados. Para que se possa conseguir a atuação dos elos no coordenograma tempo vs corrente dos elos-fusíveis desse arranjo, a curva máxima do elo protegido precisa estar abaixo da curva mínima do elo protetor por uma margem segura de tempo para qualquer falha naquele trecho. (JAVADIAN et al., 2012).

Para que se obtenha coordenação e seletividade entre os elos-fusíveis são recomendados os seguintes (ELETROBRÁS, 1982):

- O elo protegido deve ser seletivo com o elo protetor pelo menos para o valor da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo, no ponto de instalação do elo protetor.
- De forma geral, adota-se como regra utilizar no máximo 3 elos-fusíveis em série para proteção de ramais de MT. Pode-se colocar mais, se for necessário, porém é mais difícil de garantir a coordenação entre todos.
- É considerado aceitável a coordenação entre dois ou mais elos fusíveis instalados em série quando o tempo total de interrupção do elo protetor não exceder a 75% do tempo mínimo de fusão do elo protegido.
- Reserva-se elos fusíveis do tipo H, apenas para proteção de transformadores de distribuição, não sendo utilizados em proteção de ramais primários.
- Para ampliar a faixa de seletividade entre elos fusíveis e reduzir ao mínimo os tipos de elos fusíveis utilizados, deve-se optar sempre que possível por:
 - Elos preferenciais (6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140 K).
 - Elos não preferenciais (8, 12, 20, 30, 50, 80 K).

$$T_{tti} \leq 0,75 \times T_{min} \quad (3.2)$$

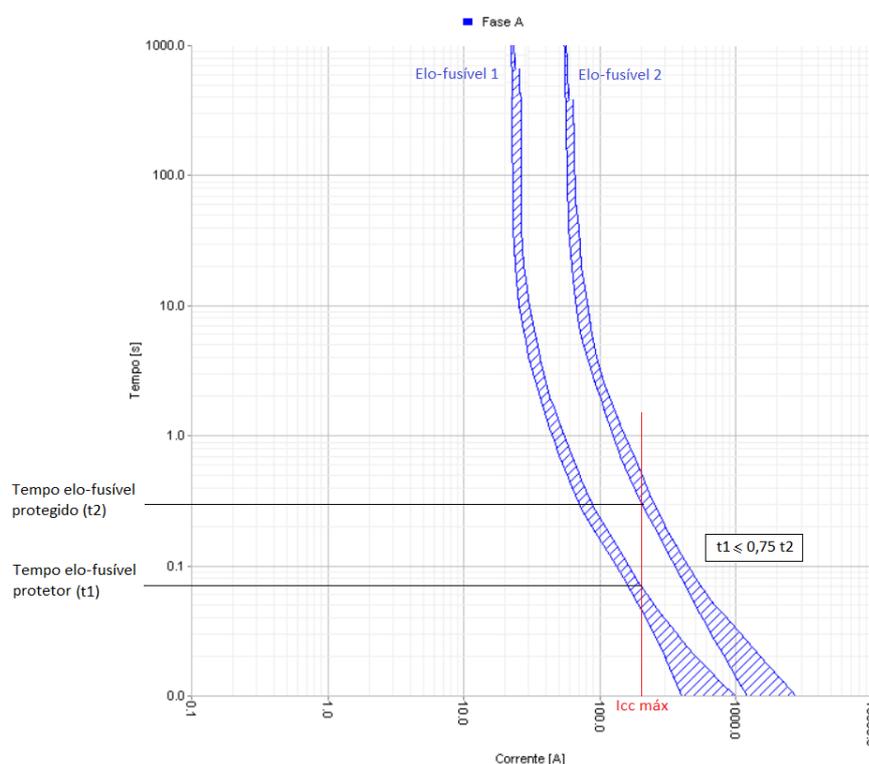
onde:

T_{tti} tempo total de interrupção do fusível protetor [s];

T_{min} tempo mínimo de fusão do elo protegido [s];

A seguir, na Figura 11, é mostrado a curva da coordenação fusível-fusível realizada segundo os critérios descritos acima.

Figura 11 – Curva de coordenação fusível-fusível



Fonte: Elaborado pela autora.

Como visto, os elos-fusíveis podem ser classificados conforme sua característica de operação, pela curva tempo vs corrente. COMASSETO nos traz que para auxiliar em sua coordenação, também podem ser utilizadas tabelas definidas pelo tipo de elo-fusível que limita as máximas correntes de curto-circuito admitidas para que haja coordenação entre os elos-fusíveis protegido e protetor. Na Tabela 2 é demonstrado um exemplo para coordenação de elos-fusíveis tipo “K”.

Tabela 2 – Valores de Elos-fusíveis tipo K para coordenar

Elo Fusível protetor tipo K	Elo Fusível protegido tipo K							
	10	15	25	40	65	100	140	200
6	190	510	840	1340	2200	3900	5800	9200
10		300	840	1340	2200	3900	5800	9200
15			430	1340	2200	3900	5800	9200
25				660	2200	3900	5800	9200
40					1100	3900	5800	9200
65						2400	5800	9200
100							2000	9200
140								4000

Fonte: Adaptado de COMASSETO (2008).

3.1.3 Critérios de seleção do religador

A viabilidade de colocar um religador no sistema, deve-se basear em análises das características da rede, estudos de curto-circuito, e indicadores de continuidade de energia. Suas características operacionais alteram-se de um dispositivo para outro, por isso é necessário especificidade para a seleção de um religador. Para tanto, devem ser levados em consideração os seguintes requisitos. (ELETROBRÁS, 1982):

- Corrente Nominal: a corrente nominal do religador deve ser maior que a máxima corrente de carga do alimentador.
- Tensão nominal: deve ser compatível com a do sistema.
- Capacidade de interrupção: deve ser superior à máxima corrente de curto-circuito trifásico, no ponto onde está instalado.
- Corrente de interrupção: deve ser maior do que a máxima corrente de curto-circuito simétrica no ponto de instalação.
- Corrente de disparo: deve ser menor do que as correntes de curto-circuito na zona de proteção do religador.
- Temporização: deve permitir que haja coordenação com outros dispositivos de proteção que estejam a jusante.

3.1.4 Ajustes do Religador

Ao ajustar os pontos necessários do equipamento, disparo de fase e disparo de neutro, se está definindo a sensibilidade dele em relação às correntes de fase e à corrente de neutro. São correntes calculadas baseadas em critérios, que especificam um range de valor a ser atendido para se tentar garantir a coordenação do dispositivo com outros equipamentos da rede. (CEEE-D, 2008).

- Disparo de fase: deve ser menor ou igual, em regime permanente, que 150% da carga máxima no ponto de instalação. E, principalmente, necessita ser menor que metade do mínimo curto-circuito bifásico na zona de proteção do religador.

$$1,5 \times I_c \leq I_{pickup} \leq \frac{1}{2} I_{ccb} \quad (3.3)$$

onde:

I_{pickup} corrente de disparo de fase [A]

I_c corrente máxima onde o religador está instalado [A]

I_{ccb} corrente de curto-circuito mínimo bifásico [A]

- Disparo de neutro: deve ser maior do que a máxima corrente de desequilíbrio do sistema, normalmente adota-se de 10% a 30% da corrente de carga. Esse valor necessita ser menor do que metade do mínimo curto-circuito fase-terra na zona de proteção do religador.

$$(0,1 \text{ a } 0,3) \times I_{pickup} \leq I_n \leq \frac{1}{2} I_{ccf} \quad (3.4)$$

onde:

I_{pickup} corrente de disparo de fase [A]

I_n corrente de disparo de neutro [A]

I_{ccf} corrente de curto-circuito mínimo fase-terra [A]

- Valor instantâneo: é o valor de corrente de curto-circuito para o qual o religador deverá abrir instantaneamente, sem considerar outros equipamentos ou seu número de operações. É definido conforme a filosofia de proteção do sistema.

Além desses itens, é preciso também que as correntes de fase e de neutro, sejam maiores que as correntes de energização dos transformadores (*inrush*) que estiverem dentro da zona de proteção do religador. É uma corrente gerada quando os transformadores de uma rede são energizados e os valores de *inrush* de cada um somam-se, podendo assim ser detectado pelo religador. Existe um método prático para se chegar o mais próximo do valor possível da corrente de *inrush* dos transformadores de um sistema. (GIGUER, 1988).

Esse método se baseia na Tabela 3, onde são mostrados valores de um fator de multiplicação (k), considerando o tempo de duração de 100ms dessa corrente, de acordo com o número de transformadores envolvidos.

Tabela 3 – Fator de multiplicação

Número de transformadores	K
1	12
2	8,4
3	7,5
4	7,1
5	6,8
6	6,5
7	6,4
8	6,3
9	6,2
10	6,1
> 10	6,0

Fonte: Adaptada de GIGUER (1988).

Calcula-se o valor total das correntes desses transformadores através de suas potências, e então multiplica-se pelo fator K que corresponde ao número de transformadores no trecho em questão.

$$Inrush = \frac{S_{TR}}{\sqrt{3} * V_{sist}} \times K \quad (3.5)$$

Onde:

Inrush corrente de energização dos transformadores [A]

S_{TR} somatório das potências nominal dos transformadores da rede [VA]

V_{sist} tensão nominal do sistema [V]

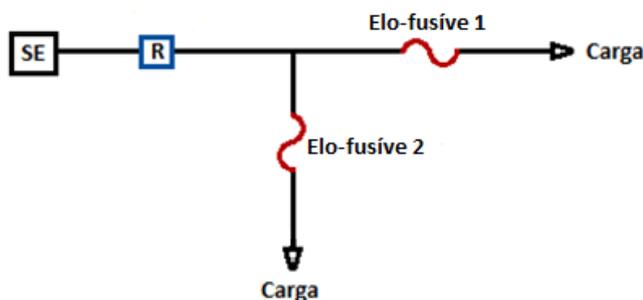
K fator de multiplicação

3.1.5 Critérios de coordenação religador-fusível

Em muitos sistemas é empregado o arranjo religador-fusível, nessa combinação, precisa-se coordenar os elos-fusíveis com as curvas de operação rápidas e lentas do religador, de modo que para faltas transitórias o religador atue antes que o fusível a jusante chegue a fundir, e para faltas permanentes o fusível atue antes que o religador entre em operação. (LEDESMA, 2012). A quantidade de operações rápidas e lentas é decidido conforme a filosofia de proteção do sistema, sendo uma das mais comuns, duas curvas rápidas e duas curvas lentas. (CEE-D, 2008). Nessa configuração, o religador tenta extinguir o defeito ao abrir nas duas primeiras operações, caso não aconteça, o elo-fusível deverá fundir na primeira

operação da curva lenta que houver para evitar que o religador bloqueie. (PEREIRA, 2007).

Figura 12 – Disposição dos equipamentos religador e elos-fusíveis



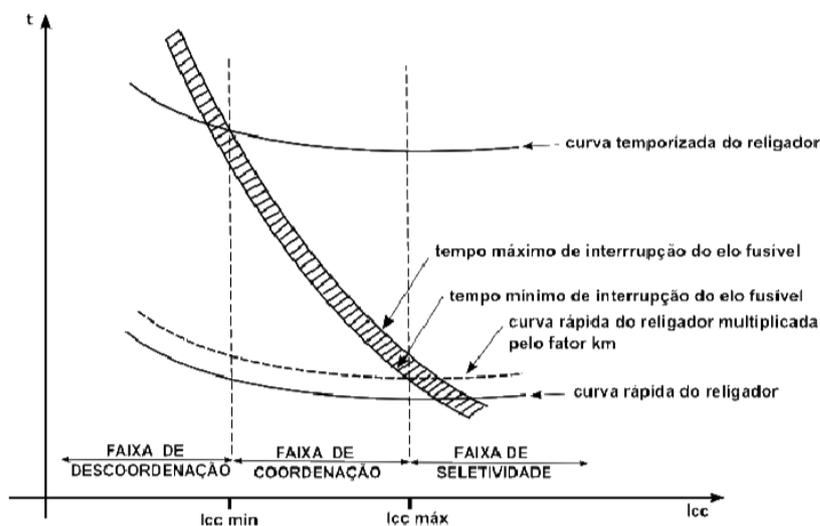
Fonte: Elaborado pela Autora.

Por tanto, o estudo de coordenação e seletividade para religador-fusível deve acontecer em duas partes (COMASSETO, 2008):

- Uma para as curvas rápidas, onde o tempo mínimo de fusão do elo deve ser maior do que o tempo que o religador tem para abrir, para todos os valores de faltas possíveis no trecho protegido.
- E outra para as curvas lentas, onde o tempo máximo de fusão do elo deve ser menor que o tempo que o religador tem para abrir, para todos os valores de faltas possíveis no trecho protegido.

Na Figura 13, é mostrado de forma geral, o funcionamento do coordenograma desse arranjo.

Figura 13 – Coordenação típica do arranjo religador-fusível



Fonte: COMASSETO (2008).

Na faixa de seletividade, para uma alta corrente de curto-circuito dentro do trecho protegido, o elo-fusível deve atuar agindo como proteção instantânea. Na faixa de coordenação, o religador através das suas operações analisa a falta tentando verificar se é transitória ou permanente, e se consegue extingui-la ou se será necessário o elo-fusível entrar em fusão. (PEREIRA, 2007).

Conforme descrito no trabalho de COMASSETO (2008) e em CEEE-D (2008), recomenda-se que para o mesmo valor de corrente, para uma coordenação mais eficaz, a curva do elo-fusível e do religador tenham pelo menos 0,2 segundos de diferença de atuação.

4 METODOLOGIA

Utilizando como base os critérios para coordenação e ajustes demonstrados anteriormente, neste capítulo, será apresentada a metodologia desenvolvida. O objetivo é determinar um roteiro de atividades para se realizar um estudo de coordenação e seletividade entre religador e elos-fusíveis a jusante deste, assim como as análises importantes para identificar a necessidade dos elos-fusíveis nos ramais em que estão. A Figura 14 ilustra a sequência do roteiro desenvolvido.

Figura 14 - Metodologia desenvolvida



Fonte: Elaborado pela autora.

Esta metodologia requer o uso de uma ferramenta computacional, sendo assim optou-se pelo PSL DMS. *Esse software* é direcionado para realizar o planejamento de redes de distribuição, onde é praticável simular o fluxo de potência de um sistema existente, porém, também é possível realizar estudos de coordenação e seletividade de proteção. Pode-se ter acesso aos parâmetros dos equipamentos, assim como seus tempos e curvas de atuação que são demonstradas em um coordenograma. A rede é importada de um banco de dados com informações de cadastro, trazendo assim a possibilidade de se fazer a análise do sistema com valores mais próximos da realidade.

4.1 Seleção da rede

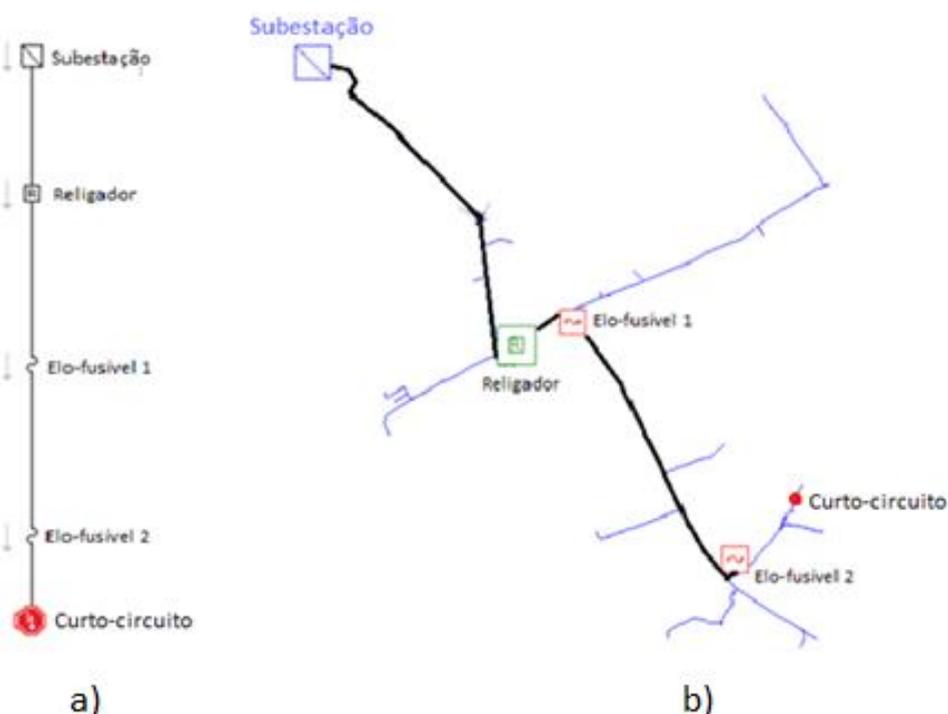
O primeiro passo é a escolha da rede a qual se pretende fazer o estudo de proteção. Recomenda-se a escolha de um sistema que possua um alto índice de operações relacionado a interrupção de energia. Não será necessário realizar sua modelagem, sendo que a rede será importada diretamente para o *PSL DMS*, a ferramenta computacional escolhida para realizar a aplicação da metodologia.

4.2 Análise da topologia da rede

Cada rede possui uma disposição singular de dispositivos, nessa etapa deve-se identificar a quantidade desses equipamentos e sua localização no sistema, especificadamente religadores e elos-fusíveis, assim como suas características operacionais. Esses são os dispositivos chaves para o estudo de proteção o qual se pretende realizar com essa metodologia.

Para os elos-fusíveis em série, deve-se mapeá-los na sequência em que estão até chegar ao religador. No *software* PSL DMS é possível ver o diagrama unifilar da proteção de um determinado trecho, como o exemplo na Figura 15, onde o diagrama a esquerda representa o trecho destacado na cor preta do alimentador da subestação a direita.

Figura 15 - Diagrama unifilar da proteção e a rede ao qual corresponde



Fonte: Elaborado pela autora.

Como se pode ver, o Elo-fusível 1 é a proteção principal do ramal onde está ocorrendo o curto-circuito, sendo os outros dispositivos proteções de retaguarda para aquele trecho específico.

4.3 Levantamento e Coleta de dados

Com a identificação da topologia, segue-se para a terceira etapa, onde essa é dividida em duas partes. Primeiramente, indica-se fazer o levantamento das características desse sistema, para que essas informações sejam utilizadas a fim de prover um adequado estudo de coordenação e seletividade da proteção. É possível obtê-las no próprio *PSL DMS* o qual também é utilizado para estudos de fluxo de potência e traz conhecimentos operacionais da rede.

Figura 16 - Diagrama tabular do PSL DMS

The screenshot shows the PSL DMS software interface. At the top, there are input fields for system parameters: Vop [kV] (23.000), Z+ [pu] (0.123+j1.850), Z- [pu] (0.123+j1.850), Zo [pu] (0.062+j0.305), V base [kV] (23.000), P inf. [kW] (0.000), and Q inf. [kVar] (0.000). Below these are checkboxes for 'Trechos', 'Nanobráveis', 'TD', 'Reguladores', 'Trafos', 'Capacitores', and 'Geradores'. The main part of the interface is a table with the following columns: ID, Ativo, Fases, P [kW], Q [kVar], S nom [kVA], V prim [kV], V sec [kV], Tap [pu], Conexão, and Modelo. The table contains 282 rows of data, with a total of 14622.000 for S nom.

ID	Ativo	Fases	P [kW]	Q [kVar]	S nom [kVA]	V prim [kV]	V sec [kV]	Tap [pu]	Conexão	Modelo
035011660	Sim	A	4.702	2.748	10.000	23.000	0.230	13.337	Delta	Outro
035011695	Sim	ABC	2.710	1.833	112.500	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035011702	Sim	ABC	0.278	0.153	30.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035011703	Sim	ABC	51.983	16.791	75.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035011708	Sim	ABC	121.716	39.391	150.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035011709	Sim	ABC	26.254	8.497	112.500	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035011763	Sim	A	0.064	0.035	15.000	23.000	0.220	13.337	Delta	Outro
035011764	Sim	ABC	65.192	27.571	525.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035011838	Sim	ABC	0.212	0.117	75.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035011844	Sim	ABC	228.251	73.868	450.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035011859	Sim	A	0.000	0.000	10.000	23.000	0.220	13.337	Delta	Outro
035011876	Sim	ABC	8.471	4.582	45.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035011877	Sim	ABC	29.023	9.393	75.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035068234	Sim	A	0.000	0.000	10.000	23.000	0.220	12.702	Delta	Outro
035068363	Sim	ABC	0.265	0.136	45.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
035068410	Sim	A	0.064	0.035	10.000	23.000	0.220	13.337	Delta	Outro
035068620	Sim	C	0.308	0.170	15.000	23.000	0.220	12.702	Delta	Outro
035068771	Sim	A	0.342	0.180	10.000	23.000	0.220	13.337	Delta	Outro
035068940	Sim	A	1.165	0.525	10.000	23.000	0.220	13.337	Delta	Outro
035069323	Sim	AB	0.000	0.000	10.000	23.000	0.220	23.100	Delta	Outro
060502971	Sim	A	3.810	2.149	25.000	23.000	0.230	13.337	Delta	Outro
060503100	Sim	A	0.776	0.476	10.000	23.000	0.220	13.337	Delta	Outro
060503213	Sim	B	0.105	0.101	15.000	23.000	0.220	13.337	Delta	Outro
060509309	Sim	A	5.787	2.890	25.000	23.000	0.230	13.337	Delta	Outro
060509305	Sim	A	0.514	0.311	10.000	23.000	0.230	13.337	Delta	Outro
060509306	Sim	A	0.057	0.025	10.000	23.000	0.230	13.337	Delta	Outro
060508154	Sim	ABC	0.000	0.000	75.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
060508155	Sim	A	1.844	1.247	10.000	23.000	0.230	13.337	Delta	Outro
060509082	Sim	A	1.876	1.269	10.000	23.000	0.230	13.337	Delta	Outro
060509157	Sim	ABC	1.028	0.630	30.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
060510272	Sim	ABC	0.262	0.128	45.000	23.000	0.300	23.100	Delta	Outro
060510790	Sim	A	0.057	0.025	25.000	23.000	0.230	13.337	Delta	Outro
060510920	Sim	A	4.802	2.806	15.000	23.000	0.230	13.337	Delta	Outro
Total: 282					14622.000					

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 16 mostra o exemplo de um diagrama tabular de um alimentador. É possível ver as informações de todos os transformadores da rede aérea desse AL, assim como se for necessário, dos outros elementos que compõe a rede.

Na segunda parte, indica-se uma coleta de dados diretamente do cadastro da concessionária sobre informações de localidade e ocorrências de faltas da rede que sejam pertinentes para as futuras análises que serão realizadas no sistema em estudo. Podem ser obtidas pelo setor responsável da distribuidora e devem ser agregadas às informações retiradas da primeira parte.

4.4 Definição de premissas

Embasado na filosofia de proteção da empresa e nos levantamentos dos itens 4.2 e 4.3, define-se premissas para avaliar as possibilidades de coordenação e ajustes

de elos-fusíveis e religadores. Essas definições serão utilizadas como limites para as análises e tomadas de decisões.

4.4.1 Premissas elos-fusíveis

Dentre as várias definições para os elos-fusíveis, pode-se destacar algumas que são importantes e serão utilizadas nesse trabalho, como: a limitação do número máximo de elos-fusíveis em série, pois acima de três elementos se torna difícil alinhar o tempo de coordenação entre eles e começa a ser necessário utilizar fusíveis de valores mais elevados para garantir a coordenação. A recomendação de não utilizar elo-fusível de 6K, ele torna a proteção do ramal muito sensível e pode abrir, inclusive, para descargas atmosféricas, além de ser de difícil coordenação em relação às curvas rápidas do religador. Também se indica não ter elos-fusíveis em série com o mesmo valor pelo fato de não haver seletividade entre eles e ter o risco de causar interrupção, em um número maior de consumidores.

Deve-se também, para a análise dos elos-fusíveis, considerar as causas dos problemas ocorridos nos ramais em suas zonas de proteção. No Módulo 8 do PRODIST, o Anexo II traz as ocorrências mais frequentes de faltas nos sistemas de distribuição, sendo consideradas neste trabalho, aquelas relacionadas com meio ambiente e terceiros. De modo geral, faltas ocorridas por vegetação tendem a ser temporárias, sendo assim, ramais que se incluam nesse caso, pode-se avaliar a retirada do elo-fusível ou tentar coordená-lo com a curva rápida do religador. Já as ocorrências por terceiros, são casos mais esporádicos, porém causam normalmente faltas permanentes, sendo necessário a colocação do elo-fusível para que haja seletividade nesses casos e o menor número possível de clientes desligados.

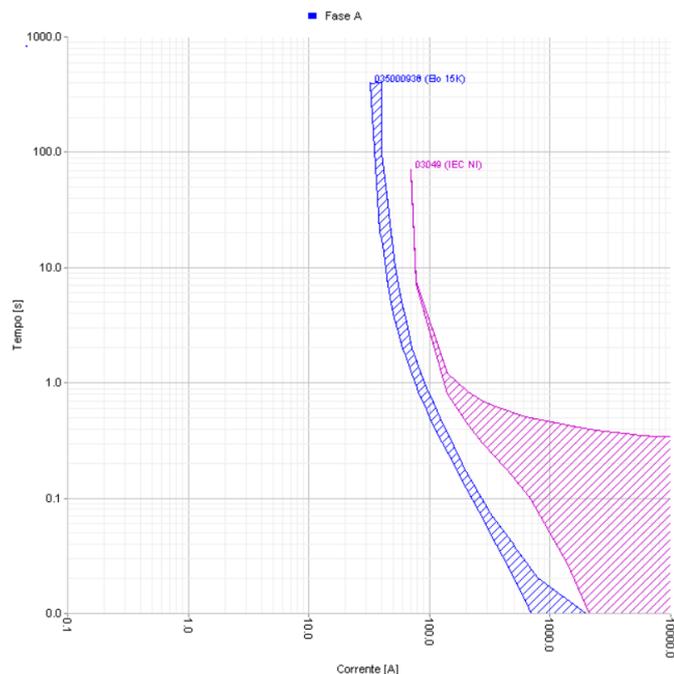
Além das causas, em segundo lugar, indica-se olhar para o tipo de carga que está sendo protegida no trecho em análise, se há uma condição de carga crítica que pode ter prejuízo na ocorrência de um religamento automático da energia, podendo assim até ter perda de algum equipamento, ou se é uma carga normal sem nenhuma restrição para desenergização ou reenergização.

4.4.2 Premissas religador

Para redes urbanas, devido a maior parte das ocorrências de falta serem causadas por terceiros, e possuir um número maior de cargas prioritárias sensíveis a pequenas interrupções, indica-se não habilitar as curvas rápidas do religador, trabalhando apenas com as curvas lentas como proteção de retaguarda, uma vez que a ocorrência de faltas temporárias é muito menor. Já para redes rurais, recomenda-se habilitar as curvas rápidas, pois há muito mais vegetação nessas áreas, e as chances de ocorrer faltas temporárias são maiores. É um meio de tentar evitar a perda seguida de elos-fusíveis e um contínuo deslocamento de equipes para trocá-los.

Em relação a coordenação com os elos-fusíveis, deve-se sempre coordenar, pelo menos, para o curto-circuito fase-terra mínimo no ramal protegido pelo elo. Para o tempo de coordenação, tentar trabalhar na ordem de 200 ms entre as curvas lentas do religador e as curvas máximas dos elos-fusíveis de modo a garantir que o religador não vá abrir antes do elo. No PSL DMS pode-se verificar se o tempo estipulado de coordenação está sendo respeitado, na Figura 17 é mostrado um exemplo onde para a curva do religador, em rosa, é adicionado uma faixa de 200 ms acima e abaixo da curva original, sendo constatado assim que a curva de atuação do elo-fusível, em azul, não transgredesse esse tempo.

Figura 17 - Coordenograma demonstrando a faixa de 200 ms



Fonte: Elaborado pela autora.

Para as curvas rápidas desconsiderar a corrente de *inrush*, elas possuem uma duração da ordem de 100 ms, e só seria possível coordenar se a corrente de *pickup* for maior que a de *inrush*, do contrário, caso a curva rápida detecte essa corrente, o religador abrirá, mas religará o sistema em seguida. Apenas as curvas lentas, deve-se garantir que estejam acima dos 100 ms, para que não detectem essa corrente de modo que não haja risco do religador abrir e bloquear.

Por fim, para a unidade instantânea é indicado que se considere 80% do valor máximo de curto-circuito trifásico para o ajuste de fase, e 80% do valor máximo do curto-circuito monofásico para o ajuste de neutro, ambos dentro da zona de proteção do religador.

4.5 Análise elos-fusíveis

Neste item são realizados procedimentos para que se possa saber se a condição dos atuais elos-fusíveis está de acordo com as premissas ou se caso não estiver, utilizá-las como padrão para a análise dos casos não conformes. Os procedimentos são: selecionar elo-fusível, analisar levantamentos dos itens 4.2 e 4.3, verificar se há transgressão das premissas do item 4.4, atuar no elo-fusível se necessário, validar curva de atuação, e se houver elos-fusíveis em série verificar coordenação entre as curvas.

4.6 Análise religadores

Nesta etapa os procedimentos realizados são para atender os critérios de coordenação do religador com os elo-fusíveis necessários. Para tanto, é preciso definir os ajustes do religador. A Figura 18 apresenta esses parâmetros no *software* PSL DMS.

Figura 18 - Campo de ajustes do religador

The image shows a software window titled 'RELIADOR' with two main sections: 'CURVAS DE FASE' and 'CURVAS DE NEUTRO'. Each section contains the following fields and controls:

- Modelo:** A text input field.
- RTC:** A field showing '0.0 : 0.0'.
- T. Coord.:** A field showing '0.000' with a unit 's'.
- Curve Selection:** Radio buttons for 'Rápida 1', 'Rápida 2', 'Lenta 1', and 'Lenta 2'.
- Exibir:** A checked checkbox.
- Curva:** A dropdown menu.
- Unidade Instantânea:** Fields for 'I 0.0' (unit 'A') and 't 0.000' (unit 's').
- Unidade Temporizada:** Fields for 'Pickup 0.0' (unit 'A') and 'Time Dial 0.00' (unit 's').

Fonte: Elaborado pela autora.

RTC é a relação de transformação de corrente, o tempo de coordenação é o tempo que se tem entre a atuação da curva do religador para a curva de um outro dispositivo de proteção, e como se pode ver, é possível definir até duas curvas rápidas e duas lentas.

Utilizando as equações 3.3 e 3.4, deve-se calcular o *range* de valores para o disparo de fase e disparo de neutro. Indica-se considerar a abertura monofásica do elo-fusível de maior carga, pois caso ocorra, haverá um desbalanceamento na rede que pode ser enxergado pelo religador e este abrir se a corrente de desequilíbrio for maior do que a corrente definida para o disparo de neutro.

Para encontrar esse valor de desequilíbrio, verifica-se a corrente das fases do ramal de maior carga e da carga do religador, como mostram as Figura 19 e 20.

Figura 19 - Características do trecho do elo-fusível

Tipo	TRECHO	Tipo	TRECHO	Tipo	TRECHO
ID	87369354	ID	87369354	ID	87369354
FLUXO <input type="checkbox"/> pu		FLUXO <input type="checkbox"/> pu		FLUXO <input type="checkbox"/> pu	
Corrente	2.482 A -26.134 °	Corrente	2.482 A 93.853 °	Corrente	2.482 A -146.149 °
Potência	29.201 kW 13.991 kVAr	Potência	29.209 kW 14.010 kVAr	Potência	29.210 kW 14.014 kVAr
Perda	0.008 W/m 0.004 VAr/m	Perda	0.008 W/m 0.004 VAr/m	Perda	0.008 W/m 0.004 VAr/m
Z total	0.314 + j 0.148 ohm	Z total	0.314 + j 0.148 ohm	Z total	0.314 + j 0.148 ohm
PARÂMETROS		PARÂMETROS		PARÂMETROS	
Ativo	<input checked="" type="checkbox"/>	Ativo	<input checked="" type="checkbox"/>	Ativo	<input checked="" type="checkbox"/>
Fases	<input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C	Fases	<input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C	Fases	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> C
Condutor	4AN	Condutor	4AN	Condutor	4AN
Dist.	232.440 m	Dist.	232.440 m	Dist.	232.440 m

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 - Características do trecho do religador

Tipo	TRECHO	Tipo	TRECHO	Tipo	TRECHO
ID	288357732	ID	288357732	ID	288357732
FLUXO <input type="checkbox"/> pu		FLUXO <input type="checkbox"/> pu		FLUXO <input type="checkbox"/> pu	
Corrente	19.336 A -25.066 °	Corrente	17.995 A 95.832 °	Corrente	17.936 A -144.195 °
Potência	238.636 kW 85.554 kVAr	Potência	223.235 kW 76.771 kVAr	Potência	222.446 kW 76.360 kVAr
Perda	0.208 W/m 0.184 VAr/m	Perda	0.173 W/m 0.159 VAr/m	Perda	0.172 W/m 0.158 VAr/m
Z total	0.208 + j 0.191 ohm	Z total	0.208 + j 0.191 ohm	Z total	0.208 + j 0.191 ohm
PARÂMETROS		PARÂMETROS		PARÂMETROS	
Ativo	<input checked="" type="checkbox"/>	Ativo	<input checked="" type="checkbox"/>	Ativo	<input checked="" type="checkbox"/>
Fases	<input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C	Fases	<input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C	Fases	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> C
Condutor	1/8SN	Condutor	1/8SN	Condutor	1/8SN
Dist.	388.990 m	Dist.	388.990 m	Dist.	388.990 m

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dessas informações, simula-se a abertura monofásica do elo-fusível em uma das fases do religador, para então verificar as componentes simétricas. O módulo da componente de sequência zero para essa condição demonstra o nível de desequilíbrio.

Figura 21 - Planilha de componentes simétricas

	Módulo Fase	Ângulo Fase		Módulo Linha
IA	19,37	25,07	IAB	19,37
IB	18,00	-95,83	IBC	18,00
IC	15,46	144,20	ICA	15,46

Valores considerados no cálculo				
	Módulo Fase	Ângulo Fase		Módulo Linha
VA	19,37	25,07	VAB	32,51
VB	18,00	-95,83	VBC	29,00
VC	15,46	144,20	VCA	30,09

Componente Simétrica (Sequência Zero)						
	Abs	Arg	Re	Im		
Va ₀	3,18	-0,65	1,08	-11,62	1,06	-0,22
Vb ₀	3,18	-0,65	1,08	-11,62	1,06	-0,22
Vc ₀	3,18	-0,65	1,08	-11,62	1,06	-0,22

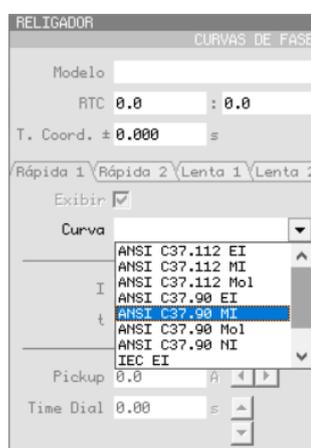
Fonte: Elaborado pela autora.

Para este exemplo a fase C é a que foi simulada, e em vermelho está ressaltado o valor encontrado.

Além desses dois parâmetros, utiliza-se também, a equação 3.5 para se calcular a corrente de *Inrush* da rede em análise. Entre as variáveis necessárias, é preciso ter o número de todos os transformadores na zona de proteção do religador e a soma de suas potências, informações obtidas no item 4.3.

A partir dos ranges de disparo de fase e disparo de neutro encontrados, analisa-se quais curvas atenderiam o sistema em estudo. A Figura 22 demonstra que o PSL DMS já possui curvas cadastradas.

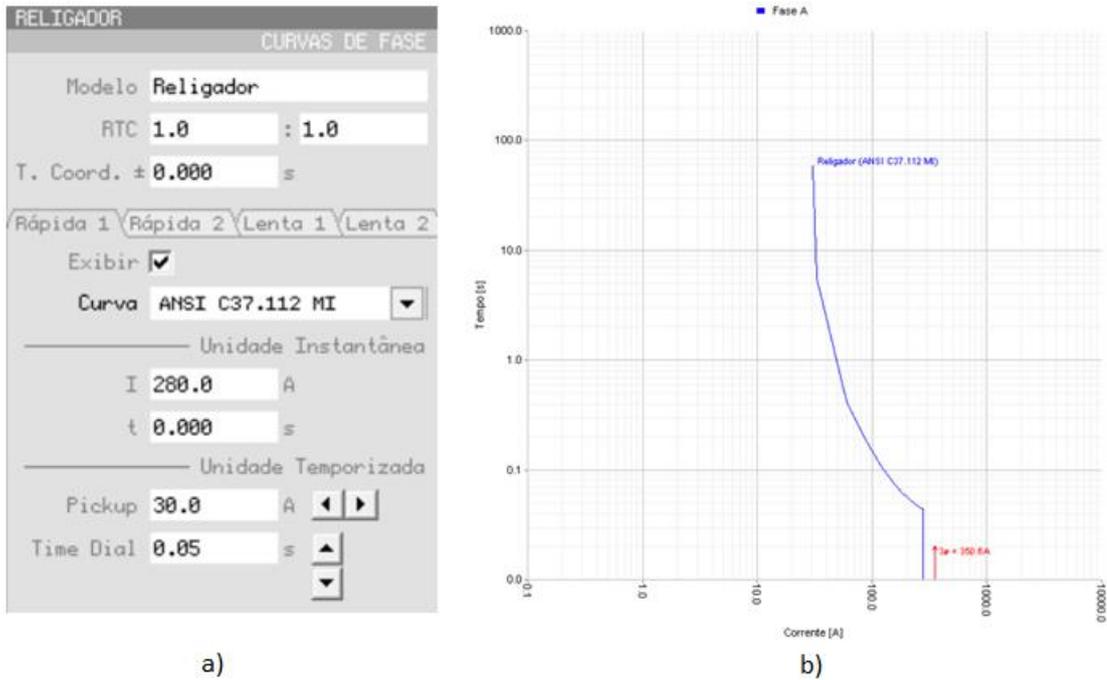
Figura 22 - Tipos de curvas de operação do religador



Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente são considerados os valores mínimos de corrente de fase e de neutro, e de dial de tempo, para então verificar qual curva coordenaria melhor com as curvas dos elos-fusíveis ao ser aplicado os curtos-circuitos máximo e mínimo em suas zonas de proteção. Na Figura 23, pode-se ver um exemplo de ajuste inicial, considerando os valores mínimos para um religador em uma rede generalizada juntamente com o coordenograma apresentando a curva resultante em relação a um curto-circuito trifásico aplicado no ponto mais próximo do religador da sua zona de proteção.

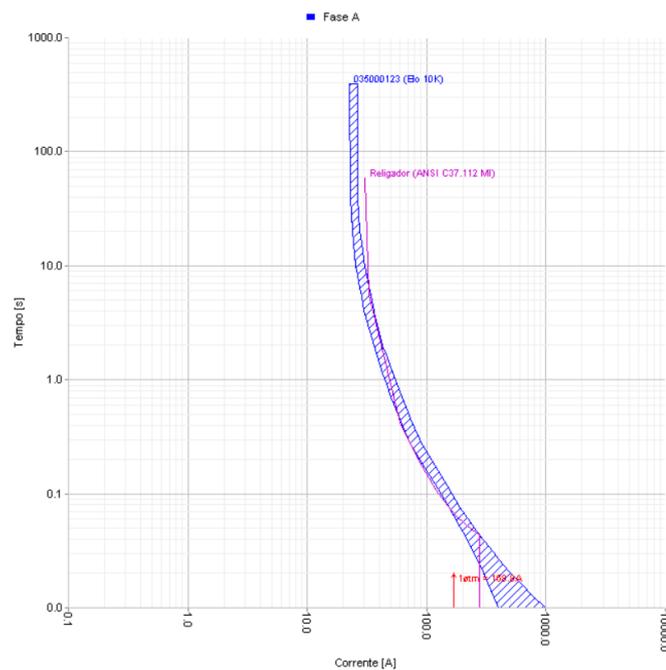
Figura 23 - Ajuste inicial religador e coordenograma resultante



Fonte: Elaborado pela autora.

Primeiramente, ajusta-se a curva rápida do religador, para assim, analisar se há coordenação com os elos-fusíveis. Na Figura 24 pode-se ver o coordenograma do religador e de um elo-fusível de 10K, para o curto-circuito monofásico mínimo no ramal do elo.

Figura 24 - Coordenação religador-fusível

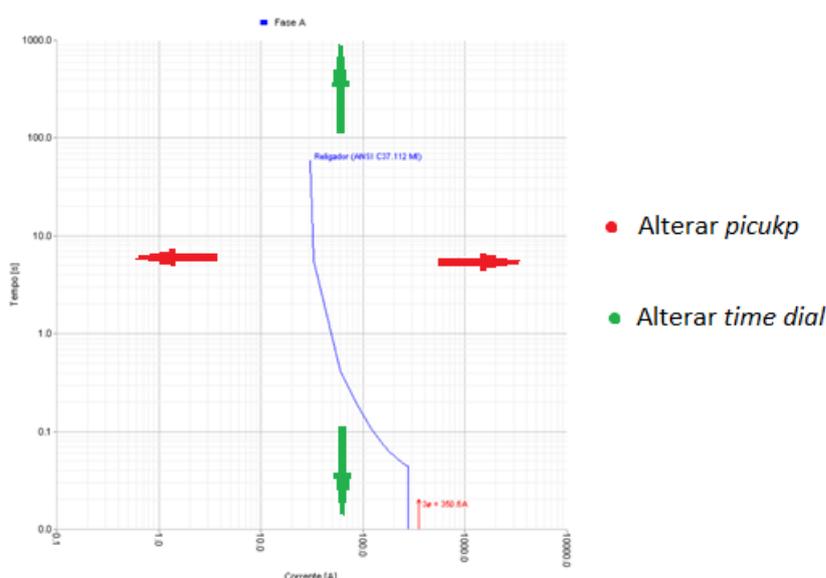


Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação à curva rápida do religador, para haver coordenação é necessário que esta esteja abaixo da curva de atuação do elo-fusível dentro da faixa de curto-circuito mínimo e máximo na zona de proteção do elo. Em relação a curva lenta do religador, é necessário que esta esteja acima da curva de atuação do elo-fusível dentro da faixa de curto-circuito mínimo e máximo na zona de proteção do elo.

Tendo coordenado a curva e as premissas sido atendidas, não há porque modificá-la. Porém, se não houver coordenação, como verificado neste exemplo, deve-se então a priori, avaliar se há alguma outra curva que coordene sem a necessidade de modificar os ajustes. Se for preciso alterar, aumentar o dial de tempo conforme necessário, assim modificando a curva no sentido vertical. Caso não seja suficiente, aumentar então a corrente de *pickup* sempre respeitando os limites definidos, alterando então a curva no sentido horizontal até atingir a coordenação.

Figura 25 – Movimentando a curva de operação do religador



Fonte: Elaborado pela autora.

O mesmo procedimento é aplicado para as curvas lentas de fase e para os ajustes das curvas de neutro, sempre respeitando as premissas respectivas a cada um. Se para as curvas lentas for necessário modificar o *pickup*, é preciso refazer o ajuste das curvas rápidas, uma vez que se deve manter o mesmo valor para os dois casos.

Uma vez finalizada a definição dos parâmetros pode ser emitida a ordem de ajuste para implementação dos equipamentos.

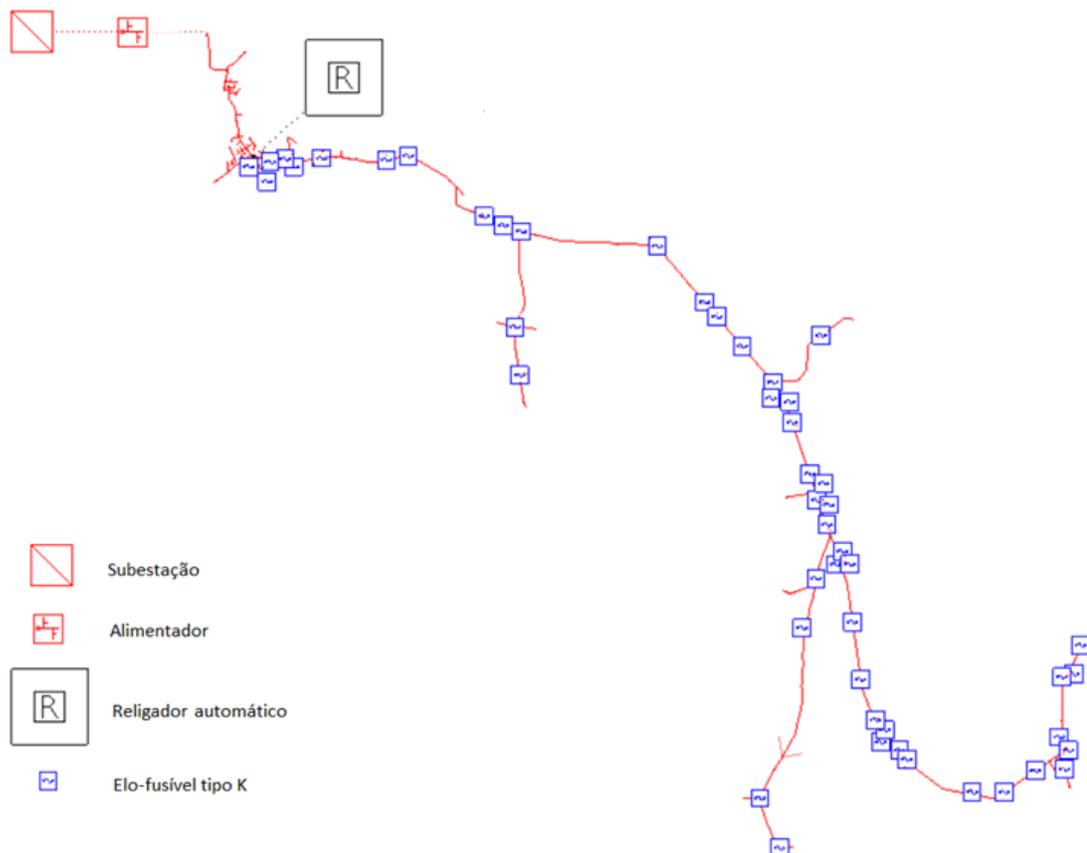
5 ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado o estudo de caso escolhido para a aplicação da metodologia, assim como as análises dos resultados.

5.1 Rede seleccionada

Para aplicação da metodologia apresentada no capítulo 4, será realizado o estudo de caso considerando o alimentador (AL) de uma subestação real. Tendo a topologia de uma rede caracteristicamente radial, sendo parte rural e parte urbana, possui um religador, o qual deve coordenar com os elos-fusíveis a jusante. Na Figura 26 é mostrada a topologia desse AL operando em sua configuração normal.

Figura 26 – Sistema analisado



Fonte: Elaborado pela autora.

O estudo foi realizado somente a partir da conexão do religador até o fim do AL, que corresponde a sua zona de proteção, e engloba toda a área rural da rede. A Tabela 4 traz algumas informações pertinentes ao estudo.

Tabela 4 - Características da rede

CAM-P	AL 18	Zona de proteção do religador
Número de transformadores	170	113
Potência Instalada (MVA)	12,72	8,4
Corrente de carga máxima (A)	90	40,7
Comprimento total de rede (m)	99535,84	62246,47
Condutor predominante	4 CAA	4 CAA
Condutor do Tronco	1/0 CAA	1/0 CAA

Fonte: Elaborado pela autora.

O religador em análise é telecomandado e suporta uma corrente de até 630 A, atendendo com folga a carga máxima, mostrada na Tabela 4 no seu ponto de instalação. A Tabela 5 apresenta os parâmetros elétricos do equivalente de Thevenin do sistema.

Tabela 5 - Parâmetros elétrico da rede

CAM-P	AL 18	Zona de proteção do religador
Tensão (kV)	23	22,7
Impedância de sequência + (p.u.)	$0,123 + j1,850$	$0,622 + j2,373$
Impedância de sequência 0 (p.u.)	$0,062 + j0,305$	$0,754 + j1,852$

Fonte: Elaborado pela autora.

Foi realizado um levantamento dos elos-fusíveis a jusante do religador, identificando-os junto com suas características operacionais e com os resultados da análise, também registrados na Figura 26.

Todos os dados das tabelas apresentadas até agora neste capítulo foram retirados diretamente do *software* PSL DMS.

Relativo às informações de cadastro, foram distribuídas de forma aleatória nas zonas de proteção de cada elo-fusível, um tipo de ocorrência de falta e um tipo de carga para fins de análise. Na Tabela 6 estão os números referentes a cada característica.

Tabela 6 - Características consideradas para a análise

Vegetação	Terceiros	Carga crítica	Carga normal
1	2	3	4

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, os dados de cadastros dos ramais dos elos-fusíveis em estudo juntamente com os levantamentos retirados do PSL DMS são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Elos-fusíveis analisados

Identificação Elo-fusível	Tipo de ocorrência	Tipo de carga	Corrente do ramal [A]	Tipo do Elo-fusível	Corrente ramal x fator 1,5
1	2	3	0,6	10K	0,9
2	2	4	0,203	10K	0,3045
3	1	3	0,26	10K	0,39
4	1	3	0,026	10K	0,039
5	1	4	0,082	10K	0,123
6	1	4	0,085	10K	0,1275
7	2	4	0,07	10K	0,105
8	2	4	0,012	10K	0,018
9	1	3	0,042	10K	0,063
10	1	3	0,027	10K	0,0405
11	2	4	0,324	15K	0,486
12	1	3	0,079	10K	0,1185
13	1	4	0,074	10K	0,111
14	2	4	0,31	10K	0,465
15	2	4	0,028	10K	0,042
16	2	4	0,03	10K	0,045
17	2	3	0,028	10K	0,042
18	1	3	2,123	15K	3,1845
19	2	4	0,164	10K	0,246
20	2	3	0,1	10K	0,15
21	2	3	0,317	10K	0,4755
22	1	3	0,006	6K	0,009
23	2	4	0,083	10K	0,1245
24	2	4	0,06	10K	0,09
25	2	4	0,01	10K	0,015
26	2	3	0,461	10K	0,6915
27	1	3	0,104	10K	0,156

Identificação Elo-fusível	Tipo de ocorrência	Tipo de carga	Corrente do ramal [A]	Tipo do Elo-fusível	Corrente ramal x fator 1,5
28	2	4	2,491	25K	3,7365
29	1	3	2,276	10K	3,414
30	2	3	2,276	15K	3,414
31	1	4	2,049	10k	3,0735
32	2	4	0,89	10K	1,335
33	1	3	0,464	10K	0,696
34	1	4	31,04	40K	46,56
35	2	3	0,002	6K	0,003
36	1	3	0,303	10K	0,4545
37	2	4	0,156	10K	0,234
38	2	3	0,905	10K	1,3575
39	2	4	6,817	10K	10,2255
40	1	4	0,006	6K	0,009
41	1	4	0,037	10K	0,0555
42	2	3	1,822	10K	2,733
43	2	4	0,012	10K	0,018
44	2	3	21,509	40K	32,2635
45	1	3	1,341	10K	2,0115
46	2	4	0,736	15K	1,104
47	1	3	0,102	10K	0,153
48	2	4	0,106	10K	0,159
49	1	4	0,322	10K	0,483
50	2	4	16,2	25K	24,3

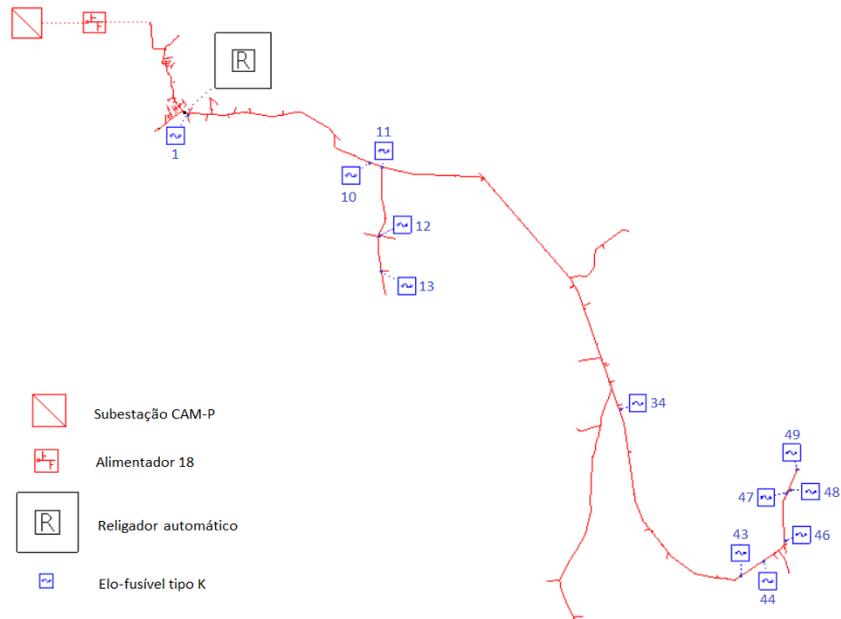
Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 Análise elos-fusíveis

Para definição dos elos-fusíveis, foi realizada uma varredura da rede com base nas premissas do estudo, analisando os levantamentos para avaliar se há alguma transgressão. Essa análise permite identificar elos-fusíveis não conformes que devem ser reavaliados. Além desses, os fusíveis considerados adequados nessa primeira varredura também serão analisados, verificando se suas condições operacionais são adequadas para sua zona de proteção.

A partir das constatações dessa análise serão apresentados a seguir os detalhamentos dos principais casos identificados, destacados na Figura 27.

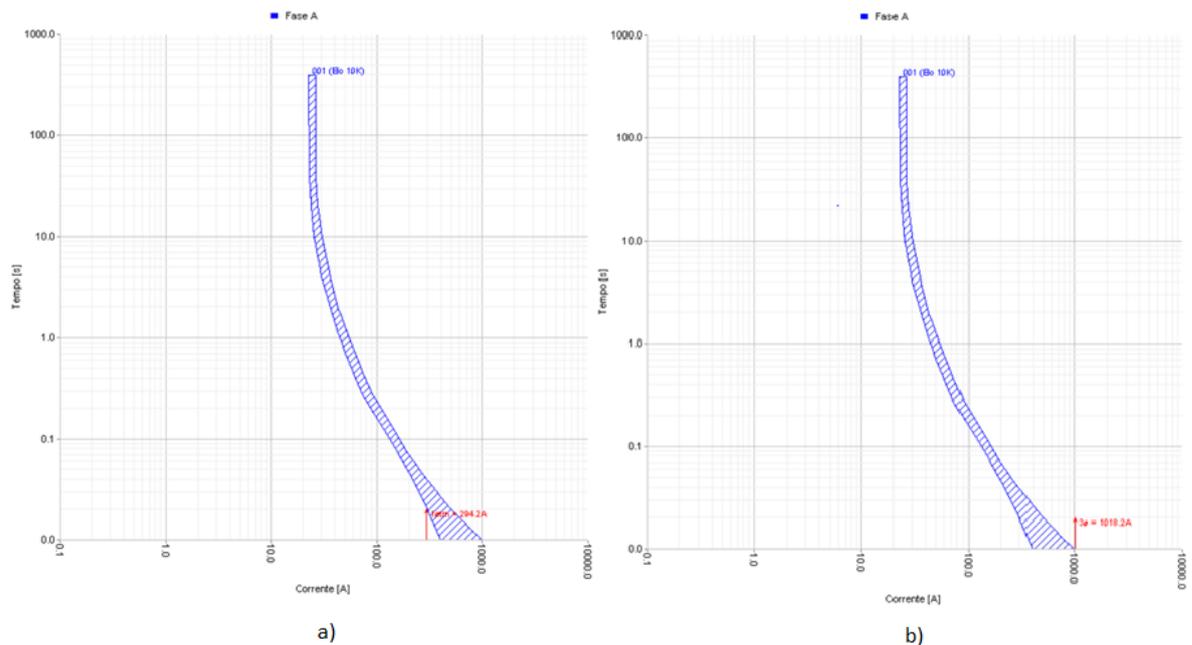
Figura 27 - Elos-fusíveis destacados durante a análise



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 28, mostra a curva de atuação do Elo 1 para o curto-circuito fase-terra mínimo e o curto-circuito trifásico, respectivamente. Para o curto-circuito fase-terra mínimo foi considerado uma impedância de solo de 40Ω (ELETROBRÁS, 1982), em todos os casos.

Figura 28 - Curva de atuação do Elo 1 (10K) para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

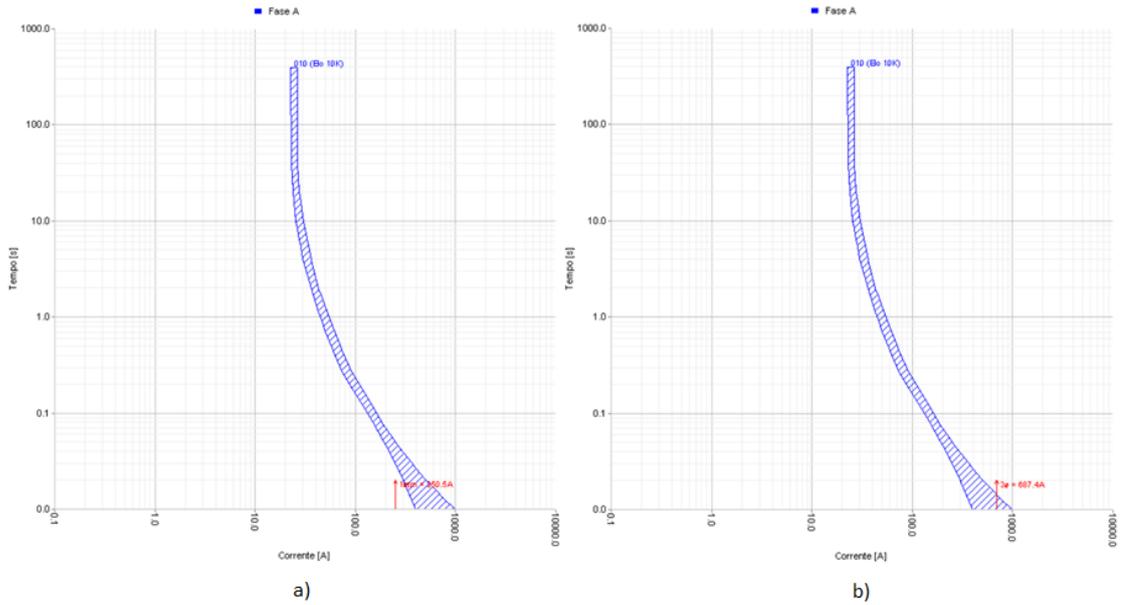
Através dos coordenogramas da Figura 29, verifica-se que para os níveis de curto-circuito mínimo e máximo aplicados no trecho protegido, o Elo 1 atenderia. Porém, considerando que para o curto-circuito trifásico esse elo-fusível abrirá instantaneamente, ele nunca irá coordenar com as curvas rápidas do religador, e dificilmente coordenará ao menos para o curto-circuito fase-terra mínimo pelo fato da curva possuir um tempo de atuação muito rápido para o valor de falta apresentado. Concluindo que se acontecesse uma falta temporária não haveria como salvar o elo e o ramal ficaria desenergizado.

Seguindo a metodologia, para avaliar se existe a necessidade de redefinir o elo-fusível ou se é possível apenas mantê-lo, foi consultado a Tabela G de modo a verificar qual a ocorrência mais comum e o tipo de carga que há nesse trecho de rede, constatando-se que eram faltas ocorridas por terceiros e a carga como sendo crítica. Conforme as premissas, para esses dois fatos não há a imposição de ter que redefinir o elo-fusível, nesse caso específico não é exigido haver coordenação entre o religador e o elo-fusível, podendo assim manter o elo de 10K.

O Elo 10 e o Elo 43 possuem as características da análise de ramal e da criticidade da carga divergentes em relação a necessidade de manter ou redefinir o elo-fusível e se é preciso coordena-lo com as curvas rápidas do religador. O Elo 10 tem como principal causa das ocorrências em sua zona de proteção a vegetação e uma carga considerada crítica. Já o Elo 43 possui ocorrências causadas por terceiros e uma carga não crítica.

Definiu-se nas premissas que se tenha como prioridade os tipos de ocorrência no ramal protegido, mas ainda é importante analisar as condições do elo-fusível como um todo. Olhando primeiro para o Elo 10, a Figura 29 mostra sua curva de atuação.

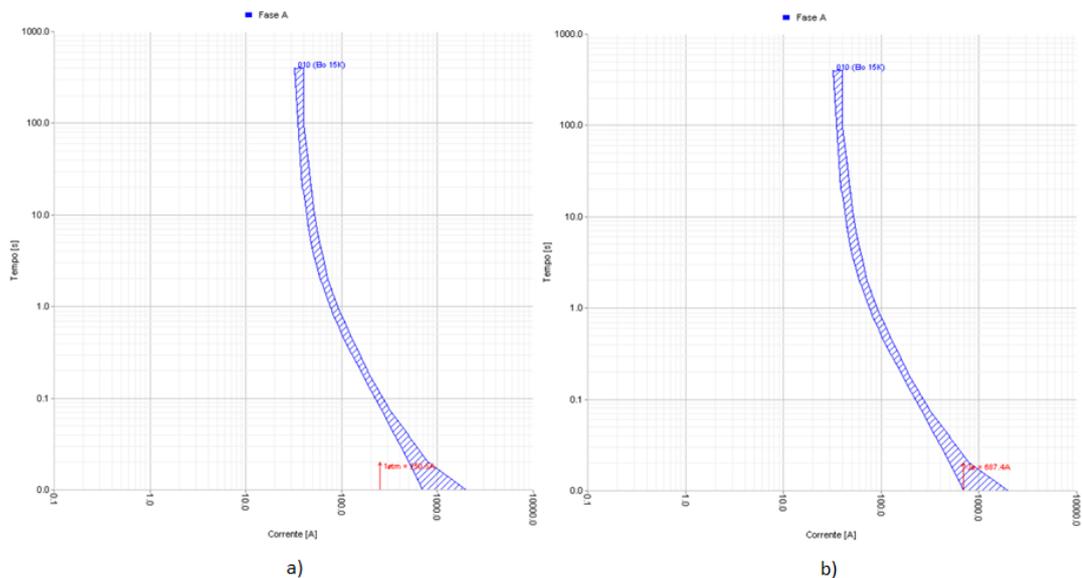
Figura 29 - Curva de atuação do Elo 10 (10K) para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que esse elo-fusível possui a mesma condição do Elo 1, por serem elos-fusíveis mais próximos da fonte, detêm valores de curto-circuito mais altos, o que dificulta a coordenação para fusíveis de valores baixos. No entanto, diferentemente do Elo 1, esse elo-fusível necessita do religador como proteção de retaguarda. Para que haja a possibilidade de coordenação com o religador, o elo foi aumentado para 15K, seguindo a ordem dentro da faixa dos elos-fusíveis preferenciais. A Figura 30 demonstra sua curva.

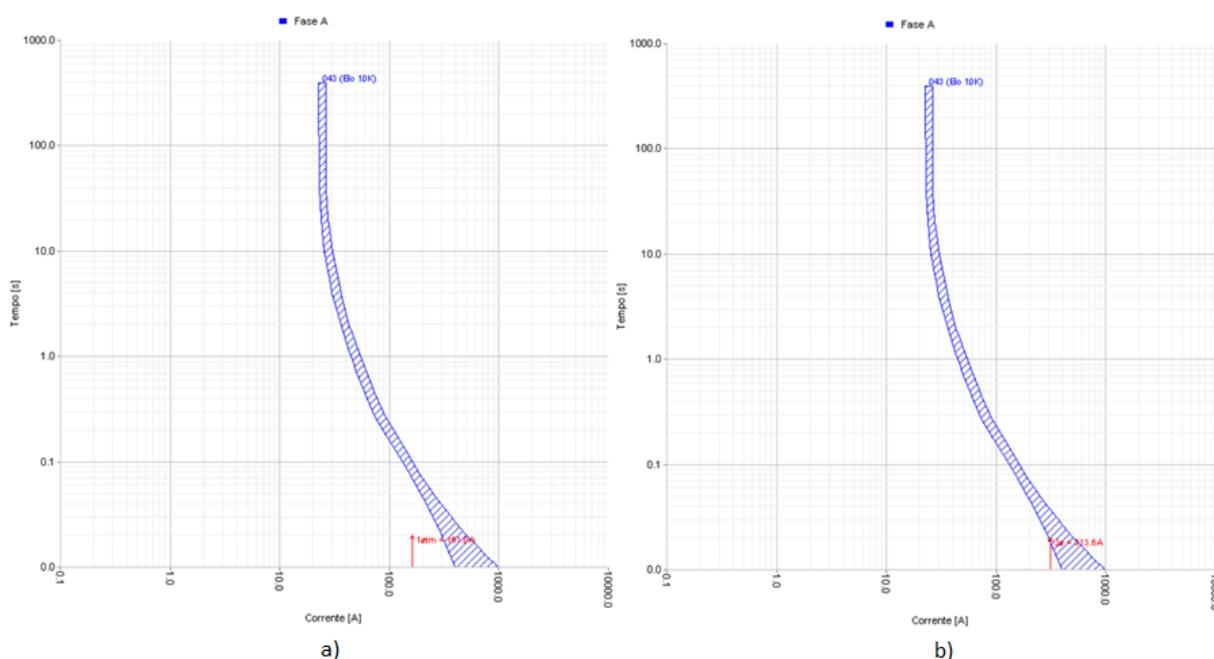
Figura 30 - Curva de atuação do Elo 10 (15K) para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar que para o curto-circuito fase-terra mínimo ao subir a curva de atuação do elo adquiriu-se uma resposta de tempo mais lenta, na ordem de ms. No entanto, para o curto-circuito trifásico ainda existe dificuldade em obter coordenação. Nesse ponto há duas possibilidades: a primeira é aumentar novamente o elo-fusível para 25K, acrescentando assim mais alguns degraus de tempo a curva. A segunda é manter o elo-fusível de 15K, tendo em vista que as chances de ocorrer um curto-circuito trifásico estatisticamente são de 2% conforme Tabela 1, muito inferior a um curto-circuito monofásico, e que desses 2%, 95% são faltas permanentes. Para as duas situações apresentadas, considerando a criticidade da carga, se ocorrer o pior caso onde seria um curto-circuito trifásico, o elo-fusível precisa ser mais seletivo do que coordenado, concluindo-se que se deve deixar o elo de 15K.

Figura 31 - Curva de atuação do Elo 43 (10K) para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figuras 31, verifica-se a curva do Elo 43. Por ser um elo-fusível no fim da rede nota-se os valores de curtos-circuitos menores em relação ao Elo 10. Conforme os dados de causa de interrupção de energia do ramal, deve-se manter o elo-fusível de 10K. Mesmo que a carga não apresente ser crítica, não significa que ela tenha alguma necessidade específica em relação ao religador, uma vez que o ramal ao qual ela está ligada não possui ocorrências de faltas temporárias, logo não havendo exigências de coordenação.

Na Figura 32 está registrado os diagramas unifilares de proteção, a) e b), dos Elos 12 e 13, respectivamente.

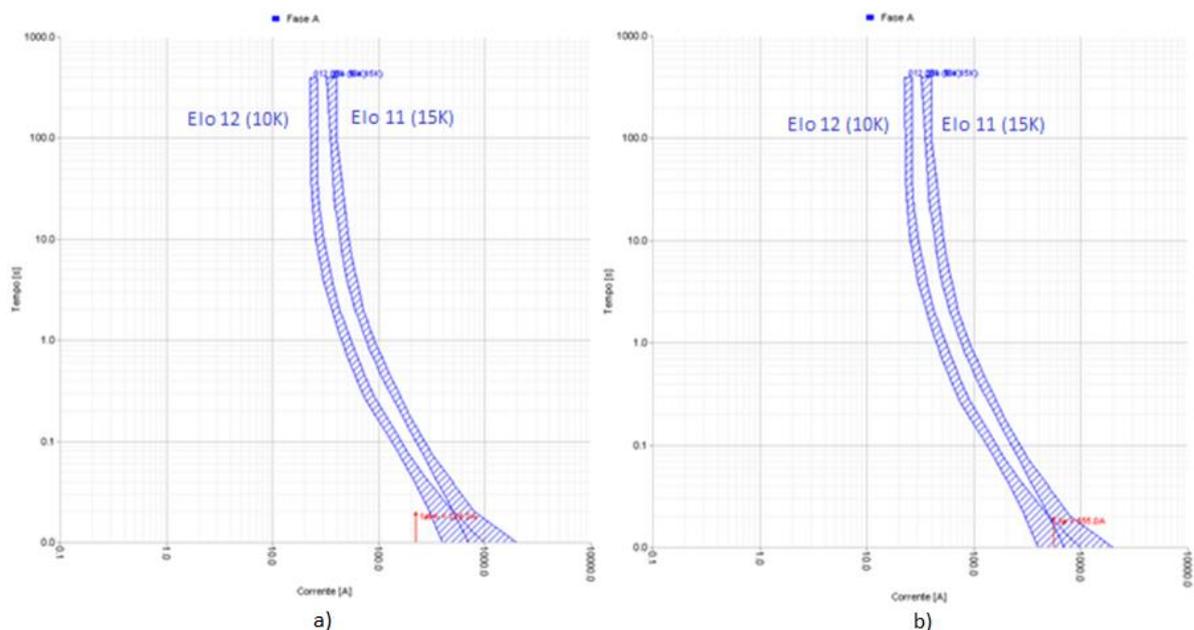
Figura 32 - Diagramas unifilares de proteção Elos 12 e 13



Fonte: Elaborado pela autora.

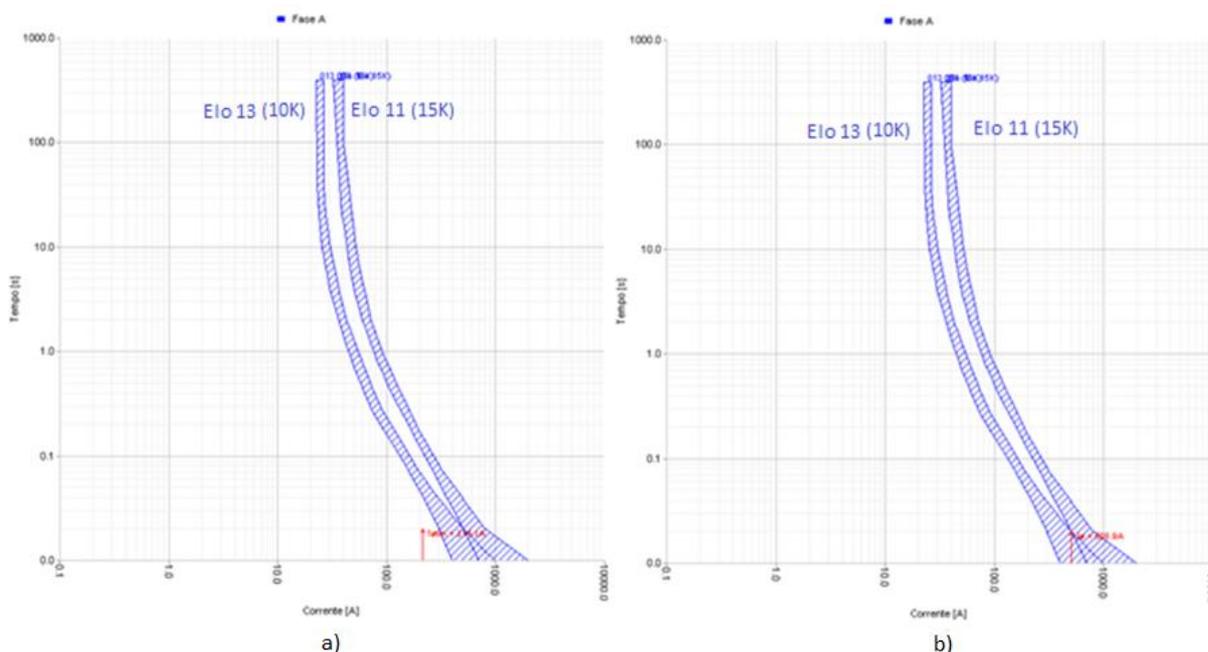
Seguindo a metodologia para os casos de elos-fusíveis em série, além da análise do ramal e da carga, deve-se verificar se há coordenação entre os elos.

Figura 33 - Curvas de atuação dos Elos 12 e 11 para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34 - Curvas de atuação dos Elos 13 e 11 para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao olhar para os dois casos, nota-se que para o valor máximo de curto-circuito aplicado na zona de proteção dos Elos 12 e 13, nenhum dos dois coordena com o Elo 11. Com o valor mínimo de curto-circuito aplicado, para saber se há coordenação, foi utilizada a equação 3.2 com os valores de tempos de cada curva necessários para o cálculo. Considerando a condição de curto-circuito mínimo da Figura 33, o Elo 12 apresenta um tempo de 0,06s para sua curva máxima, e o Elo 11, 0,145s para sua curva mínima. Resultando em 0,108s, confirmando que há coordenação entre os dois elos-fusíveis. Considerando a condição de curto-circuito mínimo da Figura 34, o Elo 13 apresenta um tempo de 0,064s para sua curva máxima, e o Elo 11, 0,157s para sua curva mínima. Isso resulta em 0,117s, comprovando que também há coordenação entre esses elos. Os valores de tempos foram retirados dos diagramas unifilares de proteção, a) e b), dos Elos 12 e 13 da Figura 35.

Figura 35 - Tempos de atuação dos Elos 11, 12 e 13



Fonte: Elaborado pela autora.

Todavia, conforme análise de ocorrências do ramal e da criticidade da carga, necessitou-se redefinir os Elos 12 e 13 para 15K, enquanto o Elo 11, manteve-se. Com isso se gerou uma condição que infringe a premissa de elos-fusíveis iguais em série, uma vez que o Elo 11 já era um elo-fusível de 15K, significando que ele possui os mesmos tempos de atuação que os Elos 12 e 13.

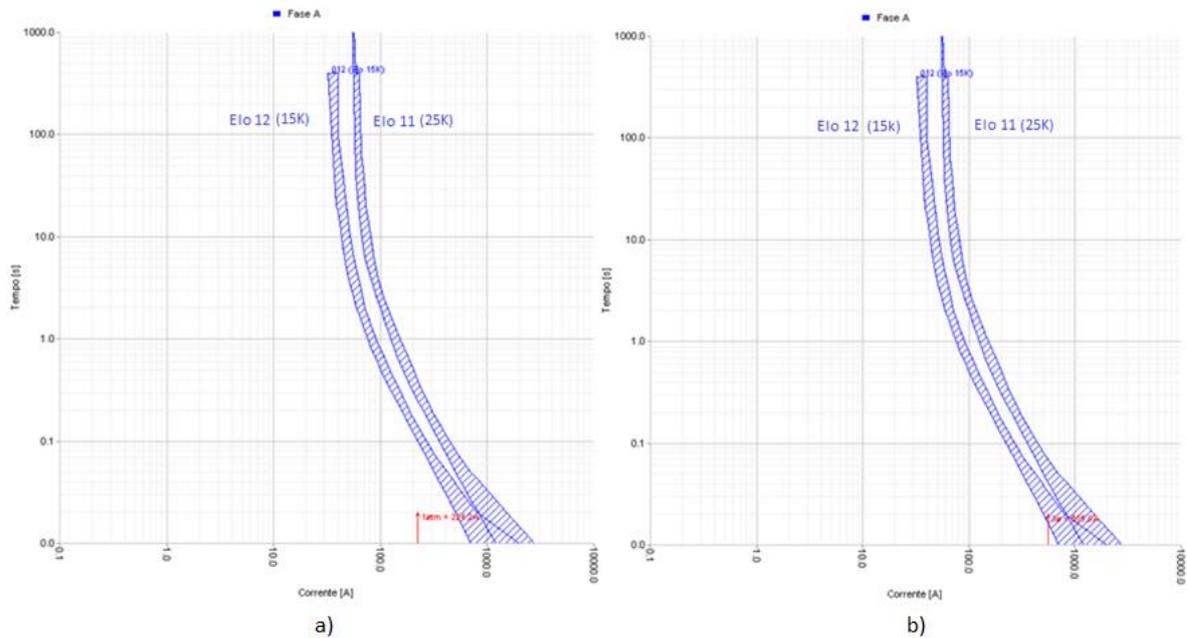
Ao analisar novamente os ramais dos três elos-fusíveis, sabe-se que o Elo 11 é o único que tem um número maior de faltas permanentes. Nesse caso, normalmente se mantém o elo-fusível que está no ramal pelo fato de não haver necessidade da atuação das curvas rápidas do religador, assim evitando a troca do fusível, mas não significando que ele não possa coordenar para essas curvas se houver uma necessidade maior. Então mais uma vez, há duas possibilidades: aumentar o Elo 11 para 25K, já que além de tudo sua carga não apresenta ser crítica, e os Elos 12 e 13 para 15K, ou eliminar os elos-fusíveis 12 e 13 pelo fato de o maior problema do ramal ser a desenergização de seus consumidores por faltas temporárias, problema que pode ser resolvido apenas com as curvas rápidas do religador, e manter o Elo 11 como 15K.

Essa análise não considera custo, no entanto sabe-se que é mais vantajoso retirar os dois elos-fusíveis podendo esses serem reutilizados em outros ramais que

necessitem, do que aumentar os três elos-fusíveis para valores maiores, considerando que nos dois casos uma equipe de manutenção terá que ser movida até o local. Sendo assim, definiu-se pela opção de retirada dos Elos 12 e 13.

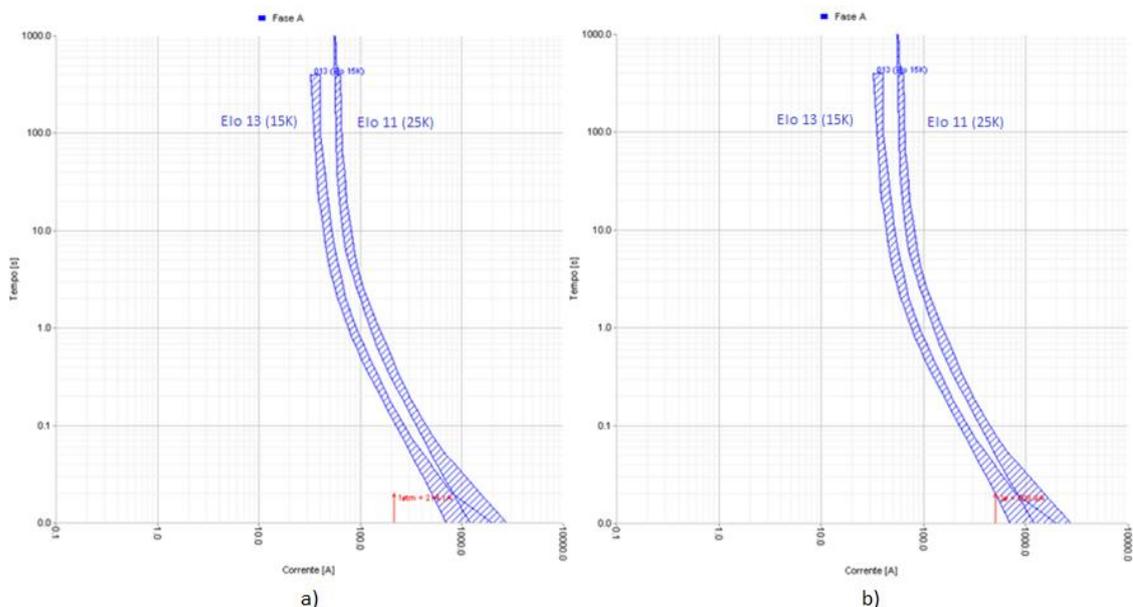
Caso fosse decidido pela opção de mantê-los, foi realizada a análise entre os tempos de atuação das curvas para verificar se haveria coordenação na condição do Elo 11 sendo de 25K e os Elos 12 e 13 de 15K.

Figura 36 - Curvas de atuação dos Elos 12 e 11 para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 37 - Curvas de atuação dos Elos 13 e 11 para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora

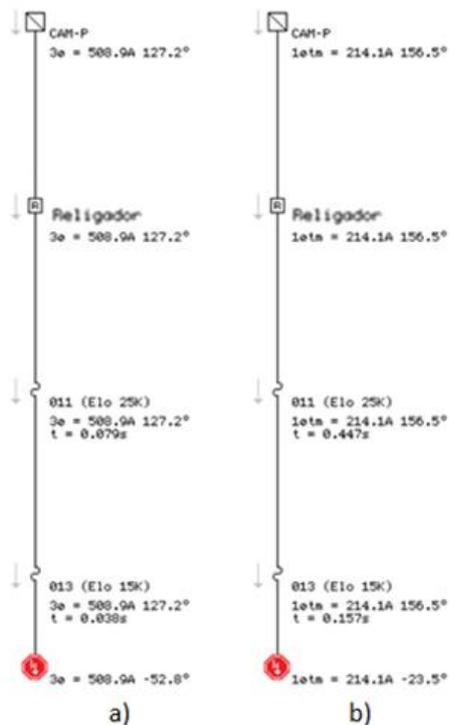
Mais uma vez foram realizados os cálculos entre os tempos de atuação das curvas para os curtos-circuitos aplicados na configuração teste dos elos-fusíveis.

Figura 38 - Tempos de atuação Elos 12 e 11



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 - Tempos de atuação Elos 13 e 11



Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando os tempos retirados das Figuras 46 e 47, tem-se as Tabelas 8 e 9 apresentando os resultados.

Tabela 8 - Coordenação dos tempos dos Elos 12 e 11

Curto-circuito	Elo 12	Elo 11	Elo 11 x 0,75
Máximo	0,035	0,071	0,05325
Mínimo	0,145	0,398	0,2985

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9 - Coordenação dos tempos dos Elos 13 e 11

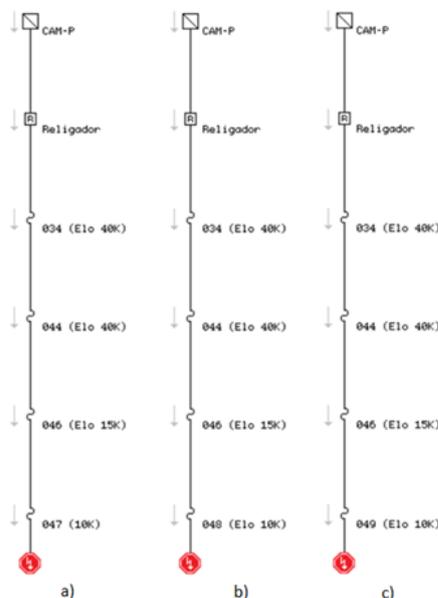
Curto-circuito	Elo 13	Elo 11	Elo 11 x 0,75
Máximo	0,038	0,079	0,05925
Mínimo	0,157	0,447	0,33525

Fonte: Elaborado pela autora.

Demonstrando assim, se fosse o caso, os elos-fusíveis estariam coordenados.

Os diagramas unifilares de proteção da Figura 40 são, respectivamente, dos Elos 47, 48 e 49.

Figura 40 - Diagramas unifilares de proteção dos Elos 47, 48 e 49

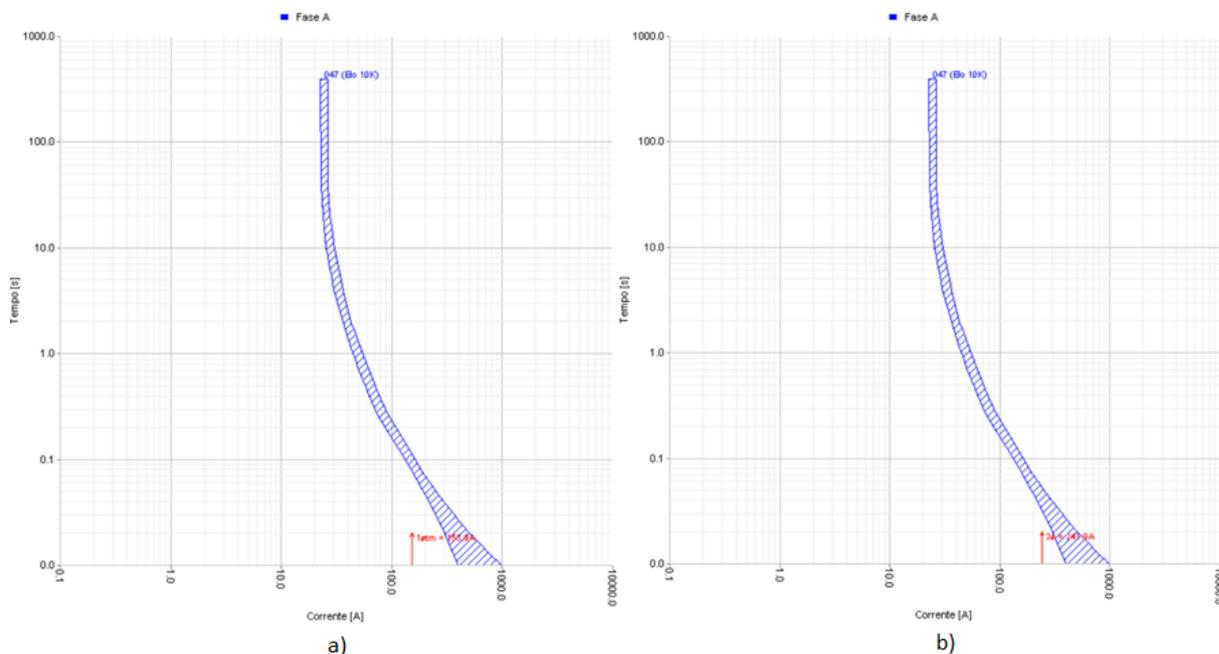


Fonte: Elaborado pela autora.

É identificável que há transgressões de premissas no caminho do religador até os três elos-fusíveis. De princípio, verifica-se que para este caso pelo menos um dos elos-fusíveis precisa ser retirado, e que não é possível manter o Elo 34 e 44 com os mesmos valores de fusível. A partir disso, realizada as análises iniciais de ramal e de

criticidade da carga, concluiu-se que os Elos 49, 47 e 34 necessitam coordenar com as curvas rápidas do religador. Os Elos 44, 46 e 48 não necessitam.

Figura 41 - Curva de atuação do Elo 47 (10K) para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

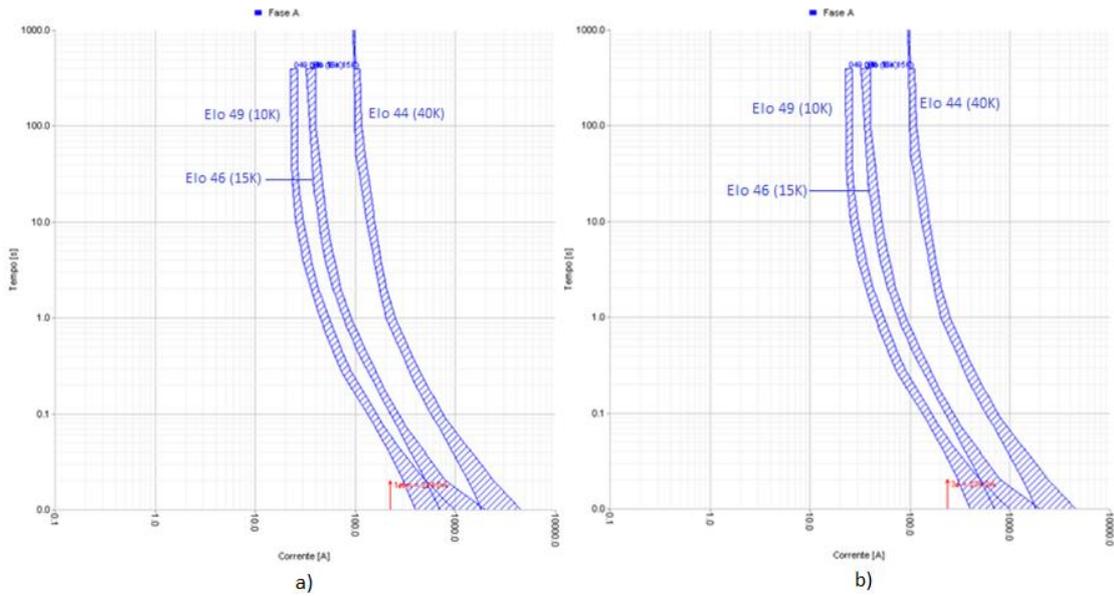
Na Figura 41 é apresentada a curva de atuação para curtos-circuitos aplicados no ramal do Elo 47. Com os valores de curto-circuito menores por ser elo-fusível de fim de rede, não é preciso modificá-lo para coordenar com o religador. O mesmo ocorre para o Elo 49. Com isso, dos três elos-fusíveis que atuam como proteção principal para os diagramas de proteção da Figura 40, o Elo 48 é o único que possui ocorrências de faltas permanentes, sendo assim este também se mantém o elo-fusível.

Com relação aos elos-fusíveis de proteção de retaguarda, verificou-se que o Elo 46 e o 44 são necessários, por assim como o Elo 48, a maioria das faltas serem permanentes, necessitando a seletividade do elo-fusível. Já o Elo 34 possui muita vegetação na área da rede principal da sua zona de proteção, ocasionando faltas temporárias nessa região. Para essa condição, têm-se que é fundamental a atuação das curvas rápidas do religador quando necessário. Além disso, ao se verificar o valor de carga no ponto de instalação do Elo 34 multiplicado pelo fator de 1,5, ultrapassa 40A que é o valor da corrente nominal do fusível. A partir dessa análise, determinou-se que o elo-fusível a ser retirado é o Elo 34, assim diminuindo para três a quantidade

de elos-fusíveis em série nos diagramas unifilares de proteção da Figura 40 e evitando que haja fusíveis com valores iguais em um mesmo arranjo.

Na Figura 42 é mostrado o comportamento das curvas de atuação dos Elos 49, 46 e 44 para os curtos-circuitos máximo e mínimo aplicados no ramal do Elo 49.

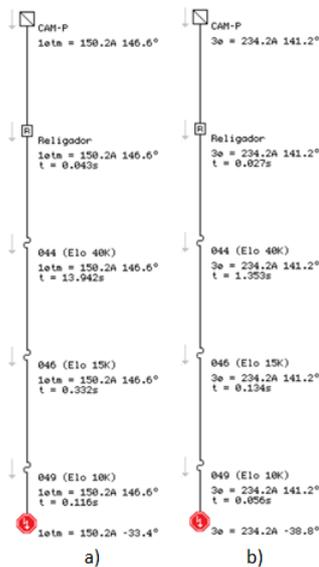
Figura 42 - Curvas de atuação dos Elo 49, 46 e 44 para o mínimo e máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Para que seja verificada a coordenação entre os três elos-fusíveis, a Figura 43 mostra os tempos de atuação para os curtos-circuitos mínimo e máximo.

Figura 43 - Tempos de atuação dos Elos 49, 46 e 44



Fonte: Elaborado pela autora.

E as Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados conforme o cálculo de coordenação.

Tabela 10 - Coordenação para os tempos dos Elos 49 e 46

Curto-circuito	Elo 49	Elo 46	Elo 46 x 0,75
Máximo	0,056	0,134	0,1005
Mínimo	0,116	0,332	0,249

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 11 - Coordenação para os tempos dos Elos 46 e 44

Curto-circuito	Elo 46	Elo 44	Elo 44 x 0,75
Máximo	0,134	1,353	1,01475
Mínimo	0,332	13,942	10,4565

Fonte: Elaborado pela autora.

Confirmando que há coordenação entres os elos-fusíveis.

Para os elos-fusíveis que possuíam o fusível de 6K, foram alterados conforme as análises de ocorrências no ramal e de criticidade da carga. A partir do Elo 37, percebeu-se pelos coordenogramas e aplicações das contingências que para os elos-fusíveis que precisavam coordenar com a curva rápida do religador, não havia mais a necessidade de modifica-los. Os níveis de curto-circuito diminuíram, como visto no exemplo do Elo 47.

Realizada a análise para todos os elos-fusíveis apresentados da Tabela 7, a Tabela 12 demonstra os resultados.

Tabela 12 - Resultado da análise dos elos-fusíveis

Identificação Elo-fusível	Resultado	Identificação Elo-fusível	Resultado
1	Mantém o fusível	26	Mantém o fusível
2	Mantém o fusível	27	Modificar para 15k
3	Modificar para 15K	28	Mantém o fusível
4	Modificar para 15k	29	Modificar para 15k
5	Modificar para 15K	30	Mantém o fusível
6	Modificar para 15k	31	Mantém o fusível
7	Mantém o fusível	32	Mantém o fusível
8	Mantém o fusível	33	Mantém o fusível
9	Modificar para 15K	34	Retirar
10	Modificar para 15k	35	Mantém o fusível
11	Mantém o fusível	36	Modificar para 15K
12	Retirar	37	Mantém o fusível

Identificação Elo-fusível	Resultado	Identificação Elo-fusível	Resultado
13	Retirar	38	Mantém o fusível
14	Mantém o fusível	39	Mantém o fusível
15	Mantém o fusível	40	Mantém o fusível
16	Mantém o fusível	41	Mantém o fusível
17	Mantém o fusível	42	Mantém o fusível
18	Mantém o fusível	43	Mantém o fusível
19	Mantém o fusível	44	Mantém o fusível
20	Mantém o fusível	45	Mantém o fusível
21	Mantém o fusível	46	Mantém o fusível
22	Modificar para 15k	47	Mantém o fusível
23	Mantém o fusível	48	Mantém o fusível
24	Mantém o fusível	49	Mantém o fusível
25	Mantém o fusível	50	Mantém o fusível

Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 Análise religador

Conforme a metodologia, aplicou-se as equações 3.3 e 3.4 para calcular o disparo de fase e o disparo de neutro, respectivamente. A Figura 44 mostra os valores mínimos de curto-circuito monofásico e bifásico na zona de proteção do religador, considerados para calcular as máximas correntes de disparo. A Tabela 13 apresenta os resultados.

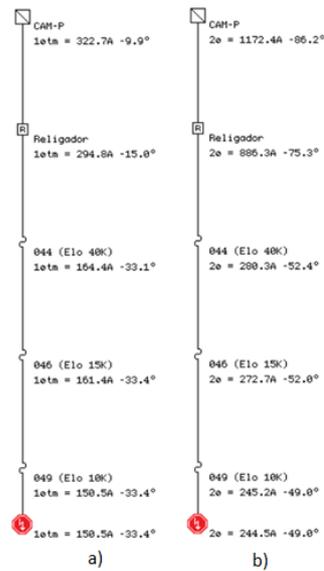
Tabela 13 - Ajustes calculados

Ajustes	Range calculado
Disparo de fase	62 A - 122 A
Disparo de neutro	12 A – 75 A
Instântaneo para fase	818,72 A
Instântaneo para neutro	793,6 A

Fonte: Elaborado pela autora.

Foi considerado para o valor mínimo de disparo de neutro como sendo 30% da carga do religador.

Figura 44 - Mínimo curto-circuito monofásico e bifásico



Fonte: Elaborado pela autora.

Entretanto, para considerar o desequilíbrio causado pela abertura monofásica do elo-fusível de maior carga, identificou-se através da Tabela 7, o Elo 44 com um valor de corrente máxima de 21,51 A. Foi analisado a corrente de desequilíbrio desse elo-fusível para a fase C como demonstra a Figura 45.

Figura 45 - Planilha componentes simétricas

	Módulo Fase	Ângulo Fase		Módulo Linha
IA	42,18	15,68	IAB	42,18
IB	39,43	-105,49	IBC	39,43
IC	18,92	134,33	ICA	18,92

Valores considerados no cálculo				
	Módulo Fase	Ângulo Fase		Módulo Linha
VA	42,18	15,68	VAB	71,10
VB	39,43	-105,49	VBC	51,60
VC	18,92	134,33	VCA	53,88

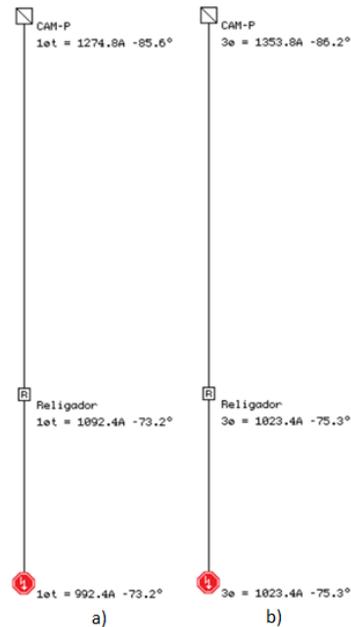
Componente Simétrica (Sequência Zero)						
			Abs	Arg	Re	Im
Va ₀	16,86	-13,06	7,11	-37,76	5,62	-4,35
Vb ₀	16,86	-13,06	7,11	-37,76	5,62	-4,35
Vc ₀	16,86	-13,06	7,11	-37,76	5,62	-4,35

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim encontrando um resultado de 7,11 A. Com essa informação, conclui-se que o valor de 12 A atende par a sensibilidade do disparo de neutro.

O valor instantâneo para fase foi calculado considerando 80% do máximo valor de curto-circuito trifásico, e para neutro 80% do máximo valor de curto-circuito monofásico na zona de proteção do religador.

Figura 46 - Máximo curto-circuito monofásico e trifásico



Fonte: Elaborado pela autora.

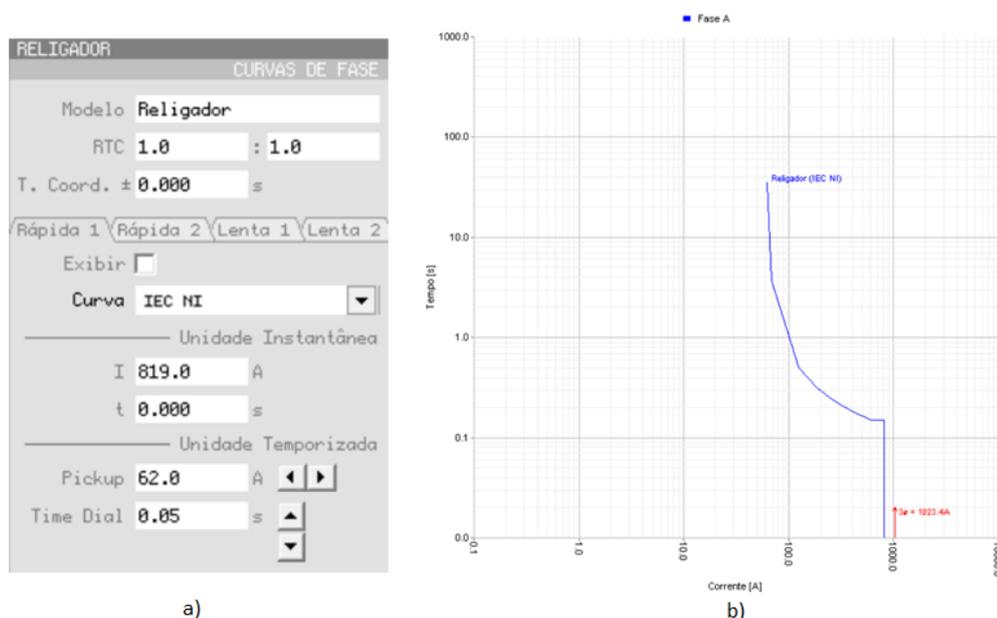
Por fim, foi calculada uma corrente de *inrush* de 1.311,88 A utilizando a equação 3.5. O fator de multiplicação foi retirado da Tabela 3, sendo utilizado o valor de 6 considerando que existem mais de dez transformadores na rede. As outras informações necessárias foram retiradas das Tabelas 4 e 5.

O valor alto de *inrush* não afetará as curvas lentas do religador, pois todas possuem um tempo de atuação superior a 0,1s. No entanto, afetará a curva rápida, a qual abrirá pela primeira operação, mas como o tempo de duração da *inrush* é na ordem de ms, o religador fechará novamente e o sistema continuará em funcionalidade normal.

5.3.1 Curvas rápidas de fase

A partir dos resultados obtidos, a Figura 47 registra o ajuste inicial do religador para a curva rápida e o coordenograma para o maior valor de curto-circuito na zona de proteção do religador.

Figura 47 - Ajustes iniciais e curva de operação rápida



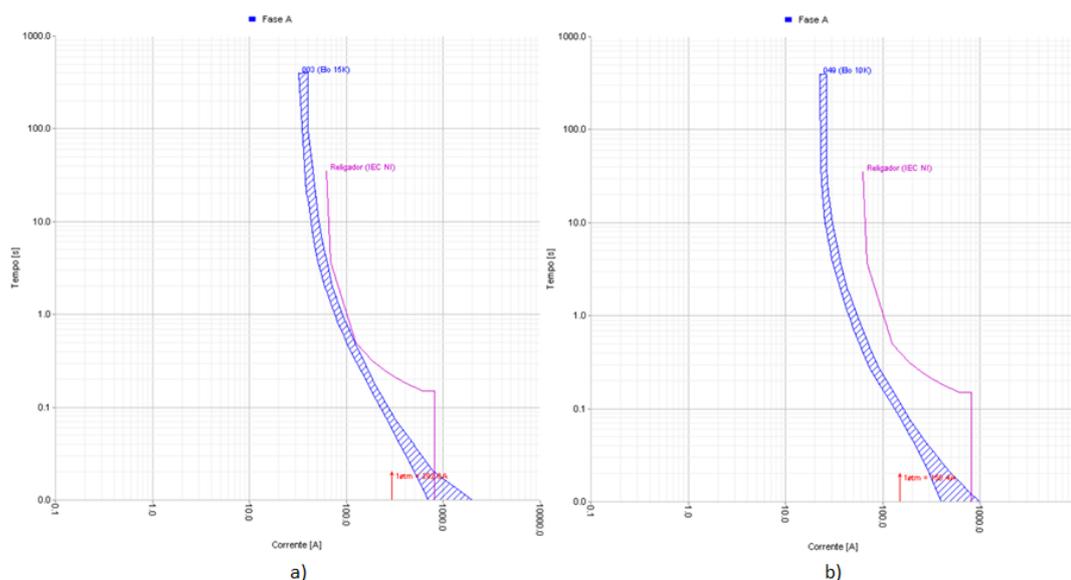
Fonte: Elaborado pela autora.

As curvas precisam ser parametrizadas para todos os elos-fusíveis da zona de proteção do religador. Mas de modo a facilitar a análise, as curvas rápidas foram coordenadas utilizando os Elos 3 e 49 que são, respectivamente, o primeiro e último fusível da rede a possuir ocorrências para faltas temporárias. E as curvas lentas foram coordenadas utilizando os Elos 44 e 50 que possuem os maiores valores de fusíveis da rede, logo, possuem curvas de atuação mais altas. Se houver coordenação e seletividade para esses quatro pontos, haverá para os outros.

A Figura 48 demonstra a curva rápida inicial do religador em relação aos Elos 3 e 49, para o mínimo curto-circuito monofásico em suas zonas de proteção.

Para todos os coordenogramas resultante dos ajustes das curvas atuação de fase, a curva azul sempre será a do elo-fusível e a rosa do religador.

Figura 48 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para a curva rápida



Fonte: Elaborado pela autora.

É perceptível a descoordenação entre as curvas, para qualquer ocorrência de curto-circuito ambos elos-fusíveis fundiriam antes que o religador pudesse atuar. Para os Elos 44 e 50, verificou-se que os ajustes atenderiam pelo fato de suas curvas de operação serem superiores aos outros elos-fusíveis, no entanto sendo exceções.

Com a condição identificada em relação aos Elos 3 e 49, foi necessário realizar alterações conforme a metodologia, sendo apresentado os resultados nos itens a seguir. Os ajustes definidos estão registrados na Figura 49.

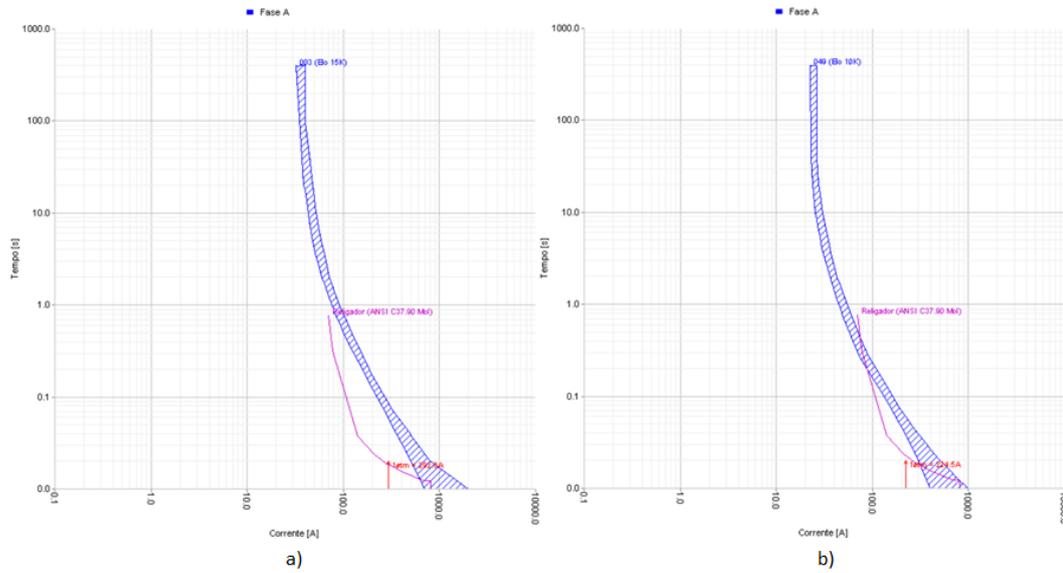
Figura 49 – Ajustes para a curva rápida de fase

RELIGADOR	
CURVAS DE FASE	
Modelo	Religador
RTC	1.0 : 1.0
T. Coord. ±	0.000 s
Rápida 1 Rápida 2 Lenta 1 Lenta 2	
Exibir	<input checked="" type="checkbox"/>
Curva	ANSI C37.90 Mo1
Unidade Instantânea	
I	819.0 A
t	0.000 s
Unidade Temporizada	
Pickup	70.0 A
Time Dial	0.05 s

Fonte: Elaborado pela autora.

E as Figuras 50 e 51 apresentam os coordenogramas resultantes.

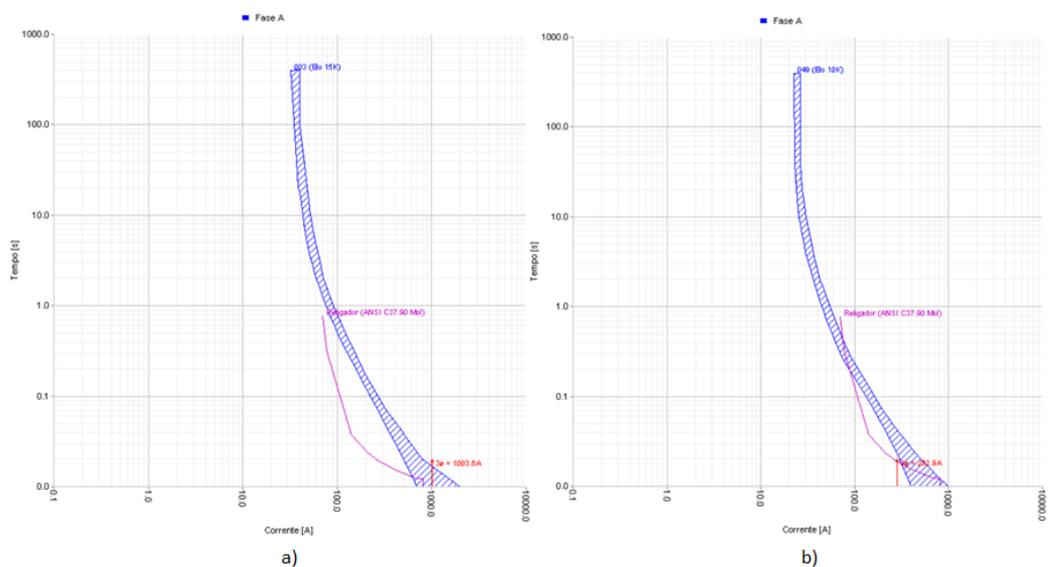
Figura 50 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para o mínimo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora

Para os níveis mínimos de contingência aplicados nas zonas de proteção dos Elo 3 e 49, as curvas rápidas atenderam com os ajustes efetivados. Porém, para os elos-fusíveis mais próximos ao fim da rede, verifica-se que quanto maior for o nível de curto-circuito o fusível tende a ser mais seletivo do que coordenado. Se fosse mantido o disparo de fase inicial, a coordenação teria sido mais satisfatória, uma vez que o valor de 62 A moveria a curva para a esquerda, se ganhando assim alguns degraus de tempo em relação a curva do elo-fusível. No entanto, foi necessário aumentá-lo para que se obtivesse coordenação para as curvas lentas também.

Figura 51 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para o máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Relativo aos níveis máximos de contingência aplicados, como já verificado na análise dos elos-fusíveis, os mais próximos da fonte possuem um valor muito alto para faltas trifásicas não havendo possibilidade de coordenação para essa condição. Demonstrado para o Elo 3, pela unidade instantânea o religador abriria antes, porém como as zonas de proteção desses elos-fusíveis possuem característica de faltas temporárias, que em sua maioria são monofásicas, não impacta tanto na proteção do ramal. Para elos-fusíveis mais próximo ao fim da rede, com a diminuição do nível de curto-circuito é possível haver coordenação para a circunstância apresentada. Contudo, para o caso do Elo 49 é uma condição estreita, o que demonstra que a grande maioria dos elos-fusíveis da rede estudada não irão coordenar para os curtos-circuitos trifásicos, a menos que o valor dos fusíveis seja aumentado, porém impactaria em todo o estudo.

5.3.2 Curvas lentas de fase

Na Figura 52 é apresentado os ajustes para as curvas lentas.

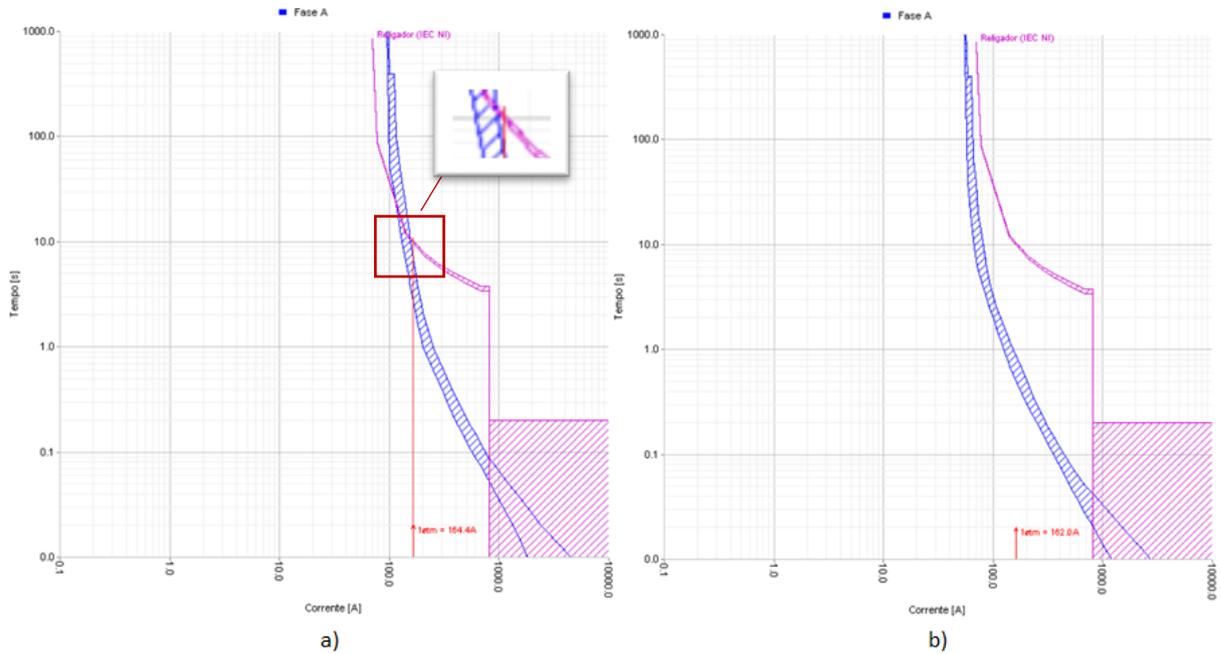
Figura 52 - Ajustes para a curvas lenta de fase

The image shows a software interface for configuring a circuit breaker (Religador) phase curve. The window title is 'RELIGADOR' and the subtitle is 'CURVAS DE FASE'. The configuration is for a 'Religador' model. The 'RTC' is set to 1.0. The 'T. Coord.' is set to 0.200 s. There are four tabs: 'Rápida 1', 'Rápida 2', 'Lenta 1', and 'Lenta 2'. The 'Lenta 1' tab is selected. The 'Exibir' checkbox is checked. The 'Curva' is set to 'IEC NI'. Under 'Unidade Instantânea', 'I' is 819.0 A and 't' is 0.000 s. Under 'Unidade Temporizada', 'Pickup' is 70.0 A and 'Time Dial' is 1.20 s.

Fonte: Elaborado pela autora.

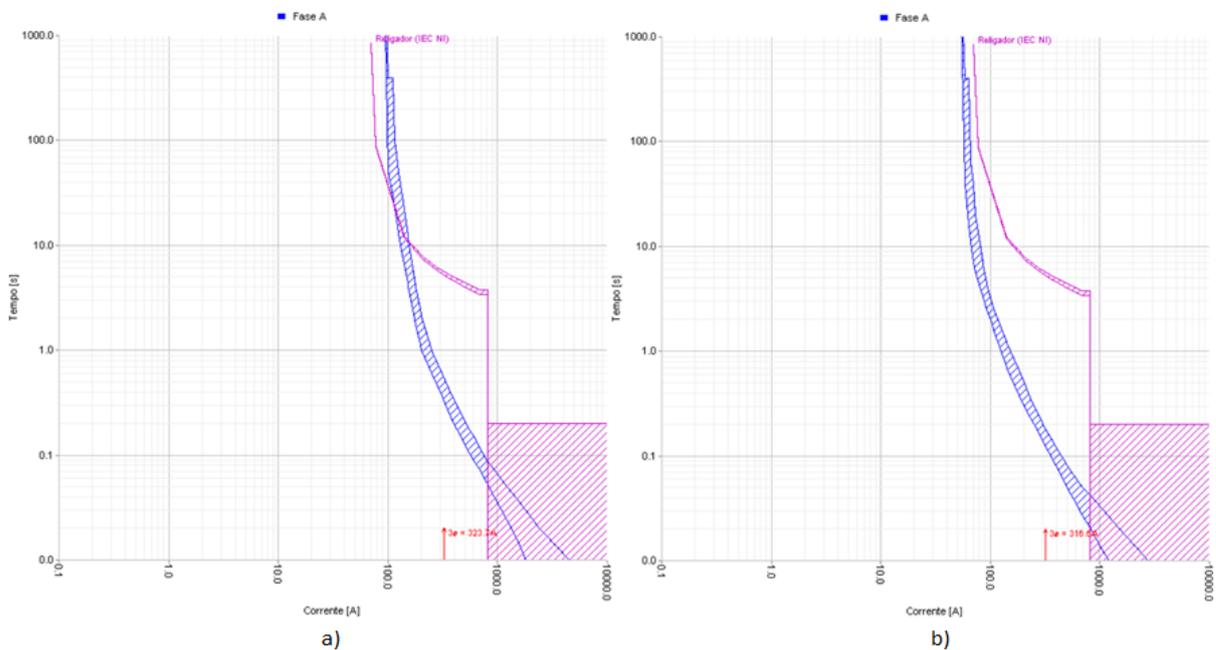
E nas Figuras 53 e 54 os coordenogramas das curvas.

Figura 53 - Coordenograma religador-fusível, Elo 44 e 50, para o mínimo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 54 - Coordenograma religador-fusível, Elo 44 e 50, para o máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

É demonstrado que para todos os níveis de contingência aplicados na zona de proteção dos Elos 44 e 50, os resultados foram satisfatórios, estando a curva atendendo os 200 ms mínimos de diferença para a curva de atuação dos elos-fusíveis.

Para o caso da curva rápida em relação ao Elo 44, tentou-se manter a atuação o mais rápido possível respeitando tempo de coordenação entre as curvas.

Verificou-se também que para o range de *pickup* de fase calculado, se houvesse um fusível com valor superior ao de 40K, não seria possível coordená-lo para as curvas lentas, por esse motivo não é recomendado ter mais de três elos-fusíveis em série em uma rede. Em casos assim, ou se mantém a coordenação entre os elos-fusíveis ou se mantém a coordenação com o religador.

5.3.3 Curvas rápidas de neutro

Na Figura 55 verifica-se os ajustes definidos para as curvas rápidas de neutro.

Figura 55 - Ajustes para a curva rápida de neutro

Modelo Religador

RTC 1.0 : 1.0

T. Coord. ± 0.000 s

Rápida 1 Rápida 2 Lenta 1 Lenta 2

Exibir

Curva ANSI C37.90 Mo1

Unidade Instantânea

I 794.0 A

t 0.000 s

Unidade Temporizada

Pickup 20.0 A

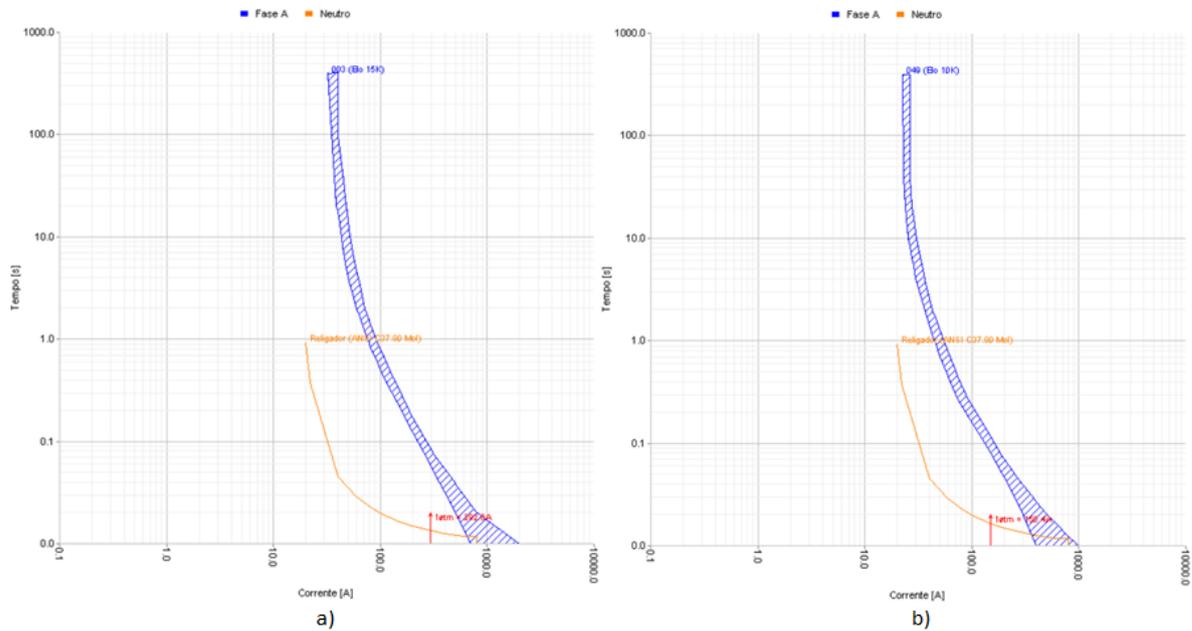
Time Dial 0.06 s

Fonte: Elaborado pela autora.

E as Figuras 56 registra os coordenogramas para o mínimo curto-circuito aplicado na zona de proteção dos elos-fusíveis.

Para todos os coordenogramas resultante dos ajustes das curvas atuação de neutro, a curva azul sempre será a do elo-fusível e a laranja do religador.

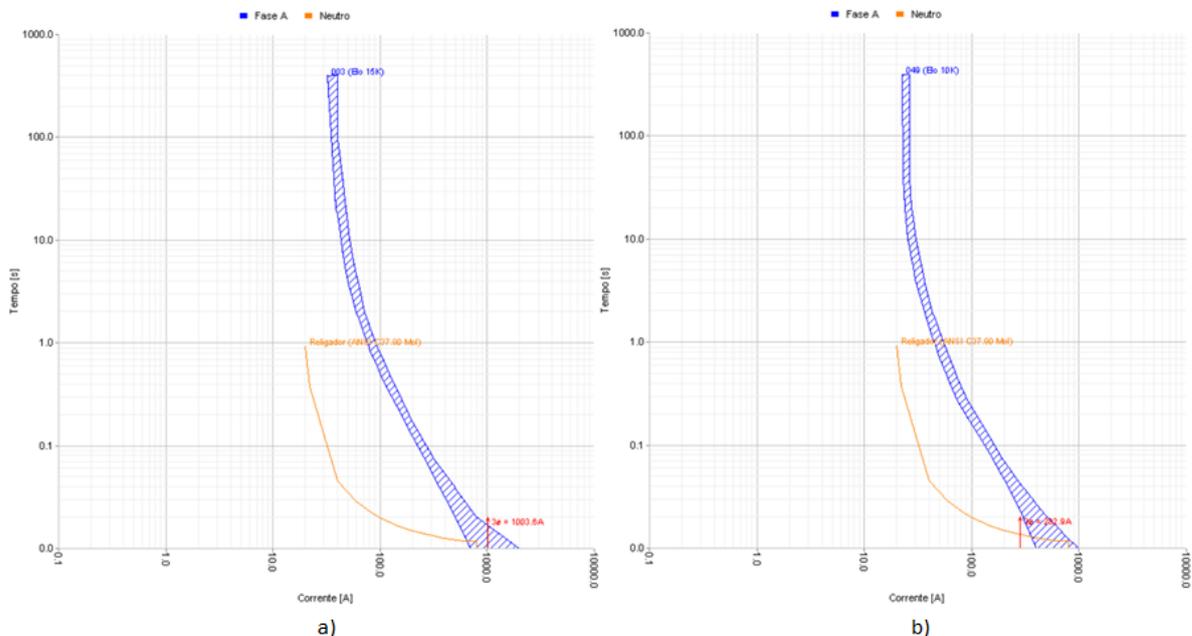
Figura 56 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para o mínimo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Para os níveis mínimos de curto-circuito aplicados nas zonas de proteção dos Elo 3 e 49, as curvas rápidas atenderam satisfatoriamente. Devido ao fato de o *picupk* de neutro ter um valor muito baixo, facilita realizar a coordenação. A maioria das curvas do religador testadas obtiveram êxito, mas por fim optou-se em manter a mesma utilizada para as curvas rápidas de fase.

Figura 57 - Coordenograma religador-fusível, Elo 3 e 49, para o máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Para os níveis máximos de curto-circuito verificou-se a mesma situação do item 5.3.1 para faltas trifásicas. Nessa condição de neutro, a unidade instantânea do religador também abriria antes do elo-fusível pelos motivos citados na análise para curvas rápidas de fase. Poder-se-ia manter o ajuste inicial para o dial de tempo, mas decidiu-se aumentar 0,01 s para que se pudesse analisar a unidade instantânea. Os dois tempos são perfeitamente aceitáveis para as condições demonstradas.

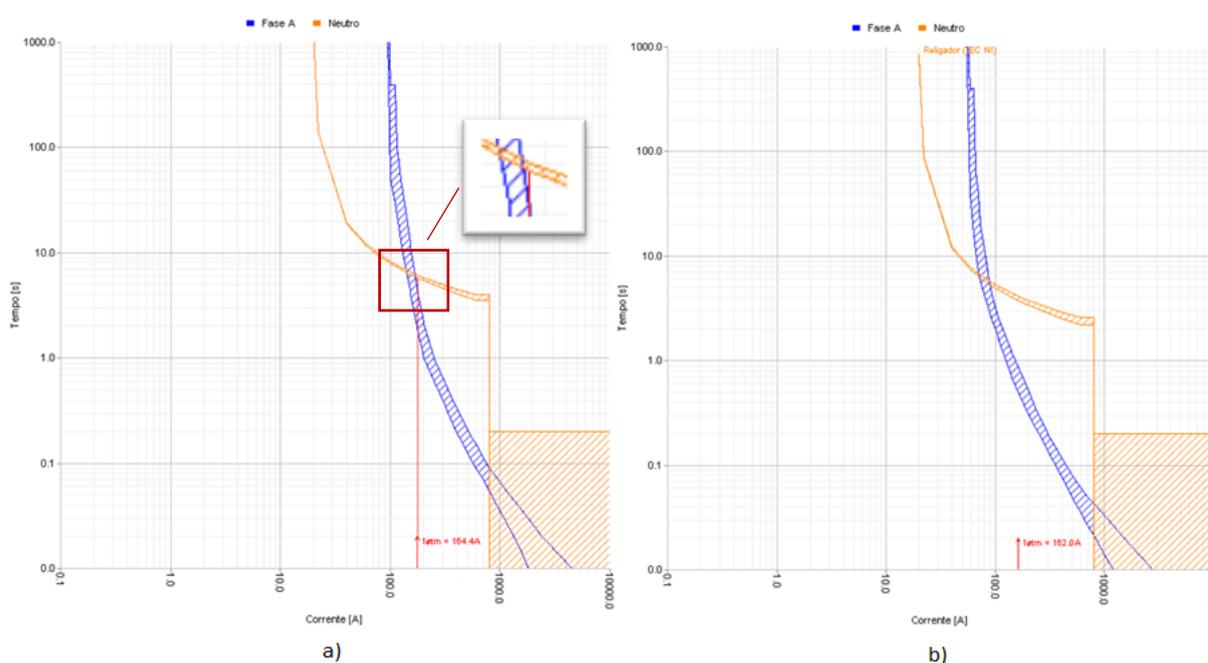
5.3.4 Curvas lentas de neutro

Figura 58 – Ajustes para a curva lenta de neutro



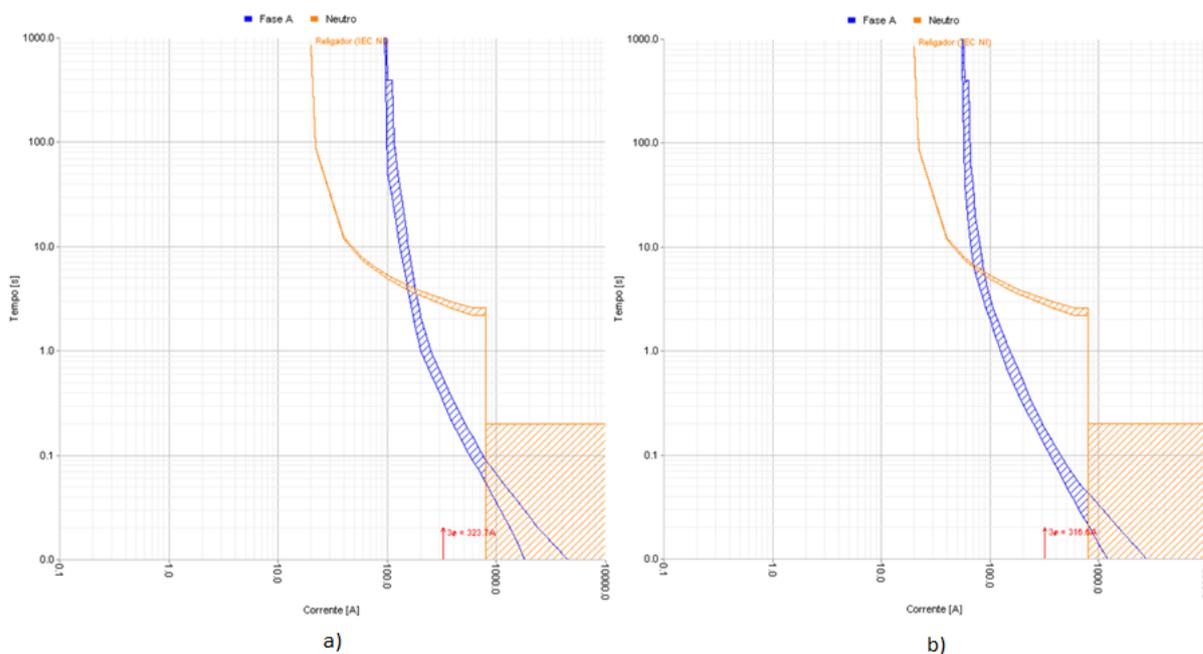
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 59 - Coordenograma religador-fusível, Elo 44 e 50, para o mínimo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 60 - Coordenograma religador-fusível, Elo 44 e 50, para o máximo curto-circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que para os níveis de contingência máximos aplicados na zona de proteção dos elos-fusíveis 44 e 50, as curvas ajustadas do religador atenderam satisfatoriamente. Mas é importante lembrar que para os fusíveis de menor valor, mesmo para as curvas lentas, ainda existirá a dificuldade em coordenar para faltas trifásicas. Pois para curvas lentas e rápidas, de fase e de neutro, os limites de corrente se mantêm, diferenciando apenas o dial de tempo.

Por fim, todos os resultados obtidos no estudo de caso não causam nenhuma restrição operacional a rede, podendo manter o fornecimento de energia em condições normais.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido uma metodologia com o auxílio do *software* PSL DMS para realizar a coordenação e seletividade direcionada a dois dispositivos de proteção específicos, de uma rede aérea generalizada de distribuição, dividida em duas partes, a análise dos elo-fusíveis, e análise do religador. O objetivo não era achar o ponto ótimo de coordenação entre os equipamentos, mas sim um ponto que atendesse os critérios e premissas e que tentasse garantir que estivessem coordenados. Para a metodologia desenvolvida não foi considerado custos de operação, equipamentos além do religador e elo-fusível ou reconfigurações de rede. No entanto, são variáveis que com certeza agregariam ao estudo de proteção e dariam mais confiabilidade ao mesmo.

Com base nisso, durante o trabalho verificou-se que de fato não existe um ajuste único que possa ser utilizado para todos os tipos de redes. Cada estudo tende a priorizar variáveis diferentes conforme as características operacionais do sistema. No desenvolvimento deste trabalho priorizou-se a segurança, tentando-se sempre com que os dispositivos atuassem o mais rápido possível frente às condições de curto-circuito aplicadas a rede.

Um sistema de distribuição de MT pode ter um número enorme de dispositivos de proteção, de acordo com seu tamanho e suas necessidades, além de poder possuir características distintas em diferentes partes da rede. Essas questões influenciam na eficiência de um estudo de proteção quando se precisa considerar todas elas para realizá-lo. Iniciou-se o estudo com o objetivo de englobar na proteção todos os tipos de contingências as quais a rede está susceptível, mas verificou-se que nem sempre é possível.

Dentre essas, a seguir são apresentadas conclusões mais específicas sobre a aplicação da metodologia ao sistema elétrico escolhido para estudo de caso:

- a) O comprimento da rede influencia indiretamente no ajuste das curvas do religador. Quando muito extensa, acaba existindo níveis muito diferentes de curtos-circuitos do início da rede ao final devido a diferença de impedância, o que dificulta realizar a coordenação quando se tem elos-fusíveis por toda a linha.

- b) Fusíveis de valores baixos são mais fáceis de coordenar com as curvas lentas do religador e mais difíceis com as curvas rápidas, exatamente o oposto de fusíveis de valores altos.
- c) Redes com ramais de cargas muito baixas e níveis altos de curtos-circuitos complica-se a coordenação das curvas rápidas do religador com as curvas de atuação dos elos-fusíveis para as faltas trifásicas. Pois, os fusíveis de valores baixos tendem a atuar instantaneamente para esses valores de curto-circuito.
- d) Foi possível monitorar as variações de atuação da curva de um mesmo elo-fusível para diferentes valores de curto-circuito, e como não só a carga, mas as características operacionais da rede influenciam diretamente no valor do fusível.
- e) A unidade instantânea sempre abrirá anteriormente a curva do elo-fusível para faltas trifásicas, quando este estiver muito perto ao religador, a menos que a diferença de impedância no trecho entre os dois dispositivos seja muito alta.

A utilização de uma ferramenta computacional foi de grande importância no auxílio da análise podendo assim realizar simulações com valores mais verídicos. A eficiência da coordenação e seletividade das proteções de uma rede exige que o estudo seja realizado com base em condições o mais próximo da realidade possível, para assim, verificar-se com segurança a efetividade da atuação dos equipamentos de proteção para as possibilidades de defeito.

Por fim, conclui-se que a metodologia desenvolvida pode ser, de fato, utilizada para qualquer rede, uma vez que abrange características gerais de um sistema. Para o estudo de caso apresentado neste trabalho, ela atingiu seu objetivo ao ser possível realizar o estudo de proteção. Obteve-se coordenação e seletividade para as curvas de atuação dos dispositivos em análise, dentro das possibilidades que as características da rede permitiam.

6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

- a) O desenvolvimento de uma metodologia que aprecie as possibilidades de reconfiguração da rede, para verificar se a coordenação e seletividade atenderiam as possíveis mudanças nos níveis de curto-circuito.
- b) Aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho para uma rede em anel.
- c) Analisar os transitórios causados na rede na ocorrência de religamentos automáticos.
- d) Avaliar a troca dos elos-fusível tipo K, para elos-fusíveis tipo T na rede analisada e o que isso impactaria no estudo de coordenação e seletividade.
- e) Análise das correntes transitórias de *inrush* na rede de distribuição.
- f) Realizar a análise que for necessária para coordenação e seletividade

REFERÊNCIAS

- ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em 5 de maio de 2018.
- ANEEL, PRODIST, **Módulo 8**, 7ª revisão. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 10 de maio de 2018.
- BAURU, Indel. **Curvas Características de Fusão Tempo x Corrente**. Elo-fusível tipo K. Proteção para Distribuição de Energia. 2018.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 1977.
- CEEE-D. **Seletividade / Coordenação na Proteção de Sistemas de Distribuição**. Divisão de Planejamento e Engenharia. Departamento de Projetos – Proteções. Porto Alegre, 2008.
- CEMIG. **Proteção Contra Sobrecorrentes em Redes de Distribuição Aéreas**. Diretoria de Distribuição. Estudo de Distribuição ED – 3.3. novembro de 1994.
- COMASSETTO, L. **Algoritmos Heurísticos de Otimização da Proteção e Manobra em Redes de Distribuição de Energia**. Tese de Doutorado – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- COOPER Power System. **Manual de Religadores Microprocessados**. Reference data: R289-91-34.
- ELETROBRÁS. Coleção Distribuição de Energia Elétrica. **Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição**. Editora Campus Eletrobrás, Vol. 2. Rio de Janeiro, 1982.
- FRANÇA, J. A. **Proteção do sistema de distribuição**. Curitiba, PR: José Albin França, [2014].
- GIGUER. **Proteção de Sistemas de Distribuição**. Editora Sagra, 1ª edição. Porto Alegre, 1988.
- IEEE Std. 242. **IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems**, 2001.
- JAVADIAN, S. A. M., HAGHFAM, M., FOTUHI FIROOZABAD, BATHAEE, S. M. T. **Analisis Of Protection System's Risk In Distribution Networks With DG**. Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University. 2012.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo, SP: Edgard Blücher Ltda, 2005
- KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. 2. ed. Porto Alegre, RS: Sagra Luzzatto, 1997.

LEDESMA, J. J. G. **Uma Metodologia para Análise da Coordenação e Seletividade da Proteção de Sistemas de Distribuição**. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2011.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2011.

PEREIRA, D. R. **Um Sistema do Software para Execução de Estudos de Coordenação e Seletividade em Sistemas de Distribuição**. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.

PEREIRA, Paulo. **Curso de Extensão em Proteção de Sistemas Elétricos – Apresentação**. São Leopoldo: Unisinos, 2017.

PILO, F; SOMA, G. G; RUGGERI, S; CELLI, G. **Optimal Protection Devices Allocation and Coordination in MV Distribution Networks**. In: University of Cagliari, Italy. 2011.

RAMOS, M. J. S. **Análise das correntes de curto-circuito assimétricas em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2011. Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

SATO, Fujio. **Proteção de Sistemas de Energia Elétrica**. Unicamp, São Paulo, SP, 2005.

SILVEIRA, J. G. **Sistema para seleção automática de grupos de ajustes em relés de proteção**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.