

# *Algoritmos para o ajuste da proteção de redes de distribuição de energia elétrica*

Daniela Zanchet Donida<sup>1</sup>, Rafael Corrêa<sup>2</sup>

TCC2 - Curso de Engenharia de Controle e Automação

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha

Farroupilha, Brasil

Discente<sup>1</sup>, orientador<sup>2</sup>

danieladonida@gmail.com<sup>1</sup>, rafael.correa@farroupilha.ifrs.edu.br<sup>2</sup>

**Resumo** — Este artigo tem como objetivo descrever o desenvolvimento de algoritmos capazes de realizar estudos de proteção em redes de distribuição de energia de forma automática, determinando os melhores ajustes para as proteções já instaladas – religadores, relés de sobrecorrente e elos fusíveis. Os algoritmos foram desenvolvidos na linguagem de programação Java, obedecendo a critérios específicos previstos em documentação técnica da distribuidora de energia Companhia Paulista de Força e Luz. Os algoritmos são executados para cada par de dispositivos de proteção, no sentido da subestação para o fim da rede, com o objetivo de se obter a coordenação e a seletividade das respectivas proteções. Simulações foram realizadas em uma rede de distribuição de teste e os resultados apontam que os algoritmos foram capazes de retornar ajustes para as proteções que minimizam as perdas de coordenação e seletividade, portanto, atingindo os objetivos traçados. O presente trabalho foi desenvolvido dentro da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFRS - Campus Farroupilha.

**Palavras-chave** — *proteção; rede primária; Java; distribuição de energia.*

## I. INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico de potência é composto por geração, transmissão, subtransmissão e distribuição de energia elétrica. A distribuição de energia é uma parte da estrutura que fornece energia às cargas consumidoras [1]. O sistema de distribuição mostra-se vulnerável à ocorrência de distúrbios geradores de interrupções no fornecimento, tais como: sobretensões provocadas por surtos de manobras, descargas atmosféricas, problemas estruturais da rede, problemas de natureza térmica, atos de vandalismo e curto-circuito.

Todo sistema elétrico requer um sistema de proteção que deve garantir uma boa confiabilidade na operação e segurança no fornecimento de energia elétrica. No Brasil, níveis aceitáveis de confiabilidade têm sido determinados por órgãos do setor energético, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que é responsável por regular e fiscalizar a atuação das concessionárias, estabelecendo indicadores de continuidade do serviço, tais como DIC, FIC, DEC e FEC [2]. É dever das concessionárias de energia o cumprimento das metas estabelecidas, de forma que o menor número de consumidores seja prejudicado na ocorrência de um distúrbio na rede elétrica.

Em sistemas aéreos de distribuição, os esquemas de proteção devem atender aos seguintes aspectos [2]:

- Salvar a integridade física de operadores, usuários do sistema e animais.
- Proteger materiais e equipamentos contra os danos causados por sobrecorrentes e sobrecargas.
- Melhorar a confiabilidade dos circuitos de distribuição, em consequência da possibilidade de restringir os efeitos de uma falha ao menor trecho possível do circuito, diminuindo o número de consumidores afetados e deste modo, melhorando os índices que avaliam a qualidade do fornecimento de energia.

Para que esses aspectos sejam atendidos, utiliza-se, na rede elétrica de distribuição, dispositivos de proteção contra sobrecorrente, sendo que os mais comumente utilizados são: conjunto relé e disjuntor, religadores e fusíveis de expulsão [1]. É importante que os dispositivos de proteção sejam ajustados de forma adequada, respeitando critérios técnicos específicos, para que a proteção da rede elétrica seja efetiva.

Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de algoritmos especializados que calculam e verificam os ajustes dos dispositivos de proteção de sobrecorrente de redes primárias de distribuição de energia. Os algoritmos foram desenvolvidos na linguagem de programação Java conforme os critérios e regras utilizadas pela concessionária de energia elétrica CPFL Energia. Se um algoritmo, obedecendo os critérios mínimos exigidos pela Norma GED-2912 na íntegra, não entregar uma resposta ao usuário, é feita uma flexibilização de alguns critérios, visando garantir um ajuste adequado para cada dispositivo de proteção.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em [4], são apresentados os fundamentos e a tecnologia básica para aplicação de relés de proteção em sistemas de energia elétrica, fornecendo uma referência útil para engenheiros e técnicos, bem como para estudantes desta área.

Em [5] é apresentado um acervo técnico considerável sobre tecnologia de proteção de distribuição de energia elétrica, contribuindo com informações importantes sobre aspectos dos dispositivos e de proteção para o presente trabalho.

Em [3] estão estabelecidos critérios e práticas a serem observados nos estudos de proteção para a escolha, dimensionamento e localização dos equipamentos de proteção contra sobrecorrente nas redes de distribuição aéreas das distribuidoras do Grupo CPFL Energia.

A necessidade de otimização da aplicação de investimentos tem servido como estímulo para inúmeras pesquisas, entre elas algumas são citadas a seguir.

Em [2] tem-se a proposta de desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a avaliação e otimização da confiabilidade de sistemas de distribuição a partir de duas abordagens. A primeira metodologia consiste na alocação otimizada e integrada dos dispositivos de proteção e manobras, visando a minimização de um indicador de confiabilidade associado à ocorrência de interrupções permanentes no fornecimento de energia. Para isso, foi empregado o Algoritmo Genético Simples. Uma segunda metodologia permite a caracterização da confiabilidade de forma mais ampla, considerando além da ocorrência de interrupções permanentes, a ocorrência de interrupções temporárias, empregando o Algoritmo Genético Multiobjetivo.

Em [6] foi proposto o desenvolvimento de um *software* destinado à execução de estudos de coordenação e seletividade da proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica. O *software* considera elementos inexistentes nos trabalhos semelhantes desenvolvidos até então, como: sobreaquecimento dos elos-fusíveis e do recuo dos relés eletromecânicos quando da operação de religadores, a verificação se os critérios de seletividade, coordenação e ajuste dos dispositivos foram atendidos e geração de uma matriz contendo os tempos de atuação dos dispositivos de proteção sensibilizados.

Em [7] tem-se o processo de desenvolvimento de algoritmos e de uma ferramenta computacional para a otimização dos recursos destinados à aplicação e utilização de dispositivos de manobra e proteção das redes de distribuição de energia elétrica. O *software*, batizado como ASD – Análise de Sistemas de Distribuição – permite analisar o comportamento em qualquer ponto da rede de distribuição no que se refere à potência ativa e reativa, corrente, tensão, fator de potência, carregamento de condutores e transformadores de distribuição, perdas de potência, além de representar graficamente a topologia elétrica das redes e suas variáveis de estado. Além das funcionalidades descritas acima, utilizou-se algoritmos heurísticos para a solução de problemas de confiabilidade e seletividade das redes de distribuição.

Em [8] apresentou-se um estudo de proteção de sobrecorrente de redes primárias aéreas de distribuição de energia elétrica através de uma abordagem probabilística das principais variáveis envolvidas na proteção de sobrecorrentes: tipo de falta, localização da falta e impedância de defeito para faltas envolvendo a terra. O principal objetivo do método probabilístico abordado no trabalho é avaliar e quantificar, para faixa de correntes de defeito esperadas de fase e terra no trecho de carga em estudo, se haverá ou não coordenação entre os dispositivos de proteção, permitindo ao engenheiro de proteção que não considere situações de pior caso nos ajustes dos dispositivos de proteção, nas quais a probabilidade de ocorrência é nula ou extremamente baixa.

### III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### A. Rede de Distribuição Primária

No Brasil, as redes de distribuição são classificadas de acordo com a sua tensão. A distribuição primária – foco deste trabalho – compreende o trajeto entre a subestação de

distribuição e os transformadores de distribuição ou entradas de energia de consumidores alimentados em média tensão. Os principais elementos que constituem uma rede de distribuição primária são [9]:

- Estação Transformadora de Distribuição (ETD): subestação alimentada com tensão de transmissão ou subtransmissão, através da qual são alimentados os circuitos de distribuição primária.
- Estação Transformadora (ET): subestação aérea constituída de um ou mais transformadores de distribuição, alimentados em tensão primária, dos quais são derivados os circuitos de distribuição secundária.
- Rede primária: conjunto qualquer de circuitos primários alimentados por uma ou mais ETDs. Essa rede primária utiliza normalmente 15 kV, 25 kV e 34,5 kV.
- Circuito primário: parte da rede elétrica destinada a alimentar diretamente, ou por intermédio de ramais ou sub-ramais, as cargas elétricas.
- Tronco de alimentador: circuito primário principal, do qual podem ser derivados ramais para distribuição de energia elétrica.
- Ramal: parte de um circuito primário derivado diretamente de um tronco de alimentador.

Ao longo da rede de distribuição estão presentes os dispositivos de proteção contra sobrecorrente, que serão descritos nas sessões *D*, *C* e *E*.

#### B. Coordenação e Seletividade

Coordenação é o ato ou efeito de dispor dois ou mais equipamentos de proteção em série segundo certa ordem, de forma a atuarem em uma sequência de operação pré-estabelecida [3]. A proteção é projetada e ajustada de forma a permitir o restabelecimento automático para faltas de origem transitória e manter seletividade para faltas permanentes [10].

A seletividade é a capacidade do equipamento de proteção mais próximo da falta de antecipar, sempre, a atuação do equipamento de retaguarda, independente da natureza da falta ser transitória ou permanente [3]. Dois dispositivos são seletivos se, na ocorrência de uma falta, o dispositivo mais próximo a montante da falta – dito protetor – atuar antes do dispositivo a montante do protetor – dito protegido, como mostra a Fig. 1 para o caso de faltas ocorridas nas cargas.

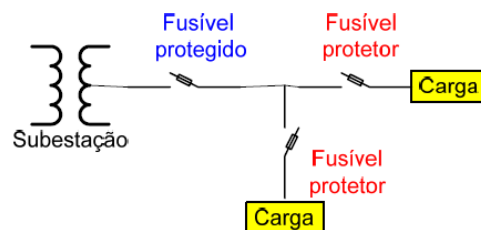


Fig. 1 – Definição dos dispositivos de proteção com relação a sua localização (McGRAW-EDISON COMPANY)

O estudo da coordenação e da seletividade é feito através da superposição das curvas características tempo vs. corrente dos diversos dispositivos em gráfico *bi-log*, com o objetivo de

comparar o tempo de atuação dos dispositivos e definir as temporizações mais adequadas para cada equipamento [3].

Conforme [3], existem duas filosofias principais para escolha dos ajustes dos equipamentos de proteção, dependendo de qual é o objetivo pretendido: “Salva fusível” e “Queima fusível”. Salva fusível é uma filosofia que permite que durante os defeitos transitórios, um equipamento de proteção com capacidade de religamento desligue o sistema elétrico, independentemente da localização do defeito, antes da fusão do elo fusível mais próximo do defeito. Depois de algum tempo, o equipamento de proteção que operou religa, retornando a energia à parte desligada. Se o defeito for transitório, o sistema permanecerá ligado. Se o defeito persistir, o elo fusível queimará, isolando a parte com defeito. Queima fusível é a filosofia contrária, que faz com que o elo fusível mais perto do defeito queime, mesmo para os defeitos transitórios.

### C. Conjunto Chave Fusível - Elo Fusível

#### 1. Princípio de Funcionamento

As chaves fusíveis são muito utilizadas devido ao baixo custo de aquisição e a facilidade de instalação e operação deste equipamento [10].

O conjunto chave e elo fusível formam um dispositivo de proteção instalado por fase em sistemas de distribuição com a finalidade de interrupção do circuito em condições de sobrecorrente. A chave fusível é um dispositivo com estrutura projetada para a conexão de um cartucho contendo um elo fusível entre seus terminais [10].

A operação da chave fusível consiste basicamente na fusão do elo fusível quando o mesmo é percorrido por uma sobrecorrente, dentro de um determinado tempo. Desta forma, um elo fusível para uma dada corrente nominal tem um elemento fusível de diâmetro e comprimento especificados, de tal forma que o mesmo responda a uma característica de tempo de operação em função de uma corrente [8].

#### 2. Classificação e tipos

Existem três tipos de elos fusíveis que são normalmente utilizados em sistemas de distribuição primária, sendo que cada um deles possui uma característica diferenciada de tempo vs. corrente. Os três tipos de elos fusíveis são [8]:

- Tipo H: são elos fusíveis de ação lenta destinados a proteção de transformadores de distribuição instalados no lado de média tensão (primário). Estão disponíveis nas correntes de 1, 2, 3 e 5 A, com correntes mínimas de atuação iguais a 3, 5, 6,5 e 9 A, respectivamente. Existe também o elo tipo H de 8 A, com corrente de interrupção máxima igual a 15 A.
- Tipo K e T: os elos tipo K têm característica rápida, enquanto os do tipo T têm característica lenta. Os elos K e T da mesma bitola têm pontos idênticos em 300 e/ou 600 segundos, tendo, portanto, as mesmas características para as correntes de sobrecarga. Porém, as curvas tempo vs. corrente divergem abaixo destes pontos. No caso, o K é mais rápido, com corrente elevada, do que o T da mesma bitola. Ambos são divididos em dois grupos: preferenciais (6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140 e 200 A) e não-preferenciais

(8, 12, 20, 30, 50 e 80 A). Assim, a indicação 40K significa um elo fusível com corrente nominal de 40 A do tipo K e, da mesma forma, um elo de 40 A do tipo T é indicado por 40T.

#### 3. Curvas Características

Cada conjunto de chave fusível – elo fusível possui três curvas de tempo vs. corrente características: curva de mínima fusão, máxima fusão e máxima interrupção. A curva de mínima fusão representa o menor tempo no qual o elo fusível demora a se fundir para uma determinada corrente [11]. A característica da curva de mínima fusão, adicionada de uma tolerância total de fabricação, deverá corresponder à curva característica máxima de fusão [12], ou seja, a curva máxima de fusão representa o maior tempo que o elo fusível demora a se fundir [11]. O tempo total da curva de máxima interrupção é composto pela soma do tempo de fusão obtido na característica de fusão tempo vs. corrente com o tempo de extinção de arco [12]. Essas curvas são mostradas na Fig. 2 para os elos fusíveis preferenciais do tipo K.

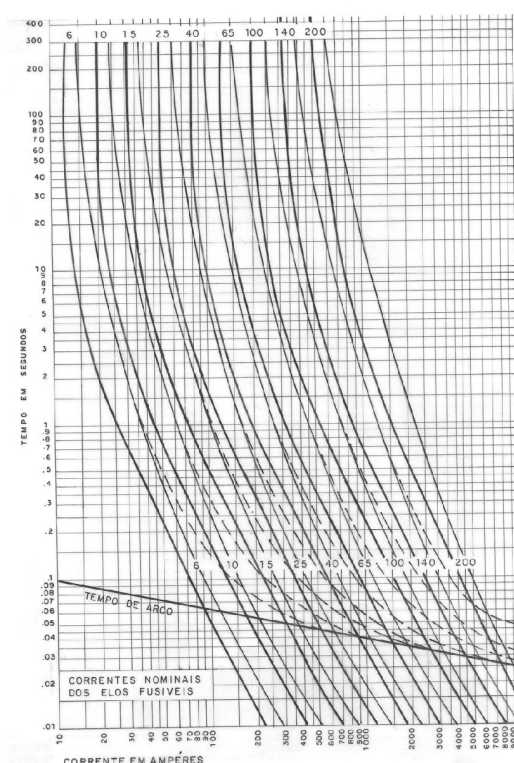


Fig. 2 – Curvas de mínima fusão, máxima fusão e tempo de arco dos elos fusíveis do tipo K. Fonte: <http://www.celesc.com.br/portal/images/arquivos/normas-tecnicas/especificacoes-tecnicas/e3130015.pdf>

#### 4. Critérios para Ajustes

O dimensionamento da chave fusível e do elo fusível deve levar em consideração os seguintes critérios [3]:

- A capacidade de interrupção do porta-fusível deve ser maior que a corrente de curto-circuito trifásico do ponto de instalação.

- II) A corrente nominal do elo fusível deve ser maior que a corrente de carga prevista para o horizonte de estudo (3 a 5 anos), conforme a Eq. (1).

$$I_{elo} > KF \times I_{carga} \quad (1)$$

Onde:

$I_{elo}$	Corrente nominal do elo fusível [A]
$I_{carga}$	Corrente de carga máxima atual passante no ponto de instalação [A]
$KF$	Fator de crescimento da carga, conforme a Eq. (2).

$$KF = \left(1 + \frac{\%}{100}\right)^n \quad (2)$$

Sendo que:

%	Fator de crescimento anual da carga [%]
$n$	Número de anos para o horizonte de estudo

- III) O elo fusível deve ser capaz de suportar a corrente de *inrush* – corrente elevada do momento de energização do circuito, conforme a Eq. (3).

$$I_{0,13} > I_{inrush} \quad (3)$$

Onde:

$I_{0,13}$	Corrente de fusão para o elo em 0,13 segundos [s]
$I_{inrush}$	Corrente de <i>inrush</i> esperada [A]

- IV) A corrente para o tempo de 300 segundos na curva de tempo máximo de interrupção do elo fusível deve ser menor que a menor corrente de curto-circuito fase-terra mínima do trecho onde o elo fusível é a proteção de retaguarda. Isso não sendo possível, deve-se no mínimo assegurar que o elo fundirá pelo menos para a menor corrente de curto-circuito fase-terra mínima do trecho sob proteção deste elo, conforme a Eq. (4).

$$I_{300} < I_{FTmin} \quad (4)$$

Onde:

$I_{300}$	Corrente de 300 segundos na curva de tempo máximo de interrupção [A]
$I_{FTmin}$	Corrente de curto-circuito fase-terra mínima de trecho onde o elo é a proteção de retaguarda [A]

- V) O elo fusível deve ser seletivo com os dispositivos que estão à montante e à jusante, quando for o caso.

## D. Relés e Disjuntores

### 1. Princípio de funcionamento

Os relés são dispositivos com características de tempo definido ou inverso e que atuam quando a corrente em um circuito de corrente alternada excede um valor pré-fixado [5].

Nos sistemas de distribuição, os relés de sobrecorrente são utilizados para supervisionar e proteger os alimentadores [6]. Durante a supervisão, o relé de sobrecorrente avalia as variações de corrente tendo por base um valor pré-fixado denominado *Tap* do relé. Estando o valor da corrente medida superior ao valor pré-ajustado, o relé envia um sinal comandando a abertura de um ou mais disjuntores [5].

Os relés de sobrecorrente possuem ajustes de proteção individualizados para defeitos de fase e para defeitos envolvendo retorno por terra [7].

### 2. Classificação e tipos

Os relés de sobrecorrente podem ser classificados em função do tempo de atuação nos seguintes tipos [5]:

- I) *Relé de sobrecorrente instantâneo* – Esse relé atua após a ocorrência de sobrecorrentes em um intervalo de tempo muito curto e não há retardo de tempo incluído propositalmente;
- II) *Relé de sobrecorrente de tempo definido* – Esse relé tem um tempo de atuação igual para todos os valores de corrente. Uma vez ajustado o tempo de atuação e a corrente mínima de atuação, o relé atua neste tempo para qualquer valor de corrente igual ou superior ao valor mínimo ajustado.
- III) *Relé de sobrecorrente de tempo inverso* – O tempo de atuação do relé é inversamente proporcional ao valor da corrente. Isto é, o relé atua em tempos decrescentes à medida que os valores de corrente aumentam e vice-versa. A curva inversa pode ser alterada e diversas formas de atuação podem ser obtidas.

Os relés de sobrecorrente temporizado (relé de tempo definido e inverso) e instantâneo são utilizados na saída das subestações garantindo a proteção contra possíveis defeitos que venham a ocorrer na rede de distribuição [13].

Outra classificação para os relés pode ser feita quanto ao princípio de operação, podendo ser eletromagnéticos, estáticos ou microprocessados – também conhecidos como relés digitais numéricos [6]. Para o desenvolvimento dos algoritmos de proteção, utilizou-se o relé digital numérico.

### 3. Curvas características

Os relés digitais numéricos possuem curvas conforme definidas pelas Normas IEC 60.255-151 ou ANSI c37.112, enquanto que relés eletromecânicos e estáticos possuem curvas definidas por seus fabricantes [3].

Nas curvas de tempo definido, a função de proteção atua quando uma corrente possuir um valor maior que a corrente de acionamento mínima (*Tap*) durante um determinado intervalo de tempo ( $t_{ajuste}$ ).

Os equipamentos que obedecem à curva IEC de tempo inverso são classificados de acordo com os valores adotados pelas suas constantes [14], destacando-se as curvas

normalmente inversa (NI), muito inversa (MI) e extremamente inversa (EI). As curvas IEC são determinadas conforme a Eq. (5).

$$t = TMS \times \left[ \frac{A}{\left( \frac{I_{TC}}{Tap} \right)^P - 1} + B \right] \quad (5)$$

Onde:

$t$	Tempo de acionamento do relé [s]
$TMS$	Dial de tempo (ajustes utilizados para temporizar o relé)
$A, B$ e $P$	Constantes que dependem do tipo de curva
$I_{TC}$	Corrente que passa pelo transformador de corrente (TC) [A]
$Tap$	Corrente de ajuste mínimo do relé [A]

A partir da Fig. 3 pode-se observar a diferença de declividade entre as curvas de operação da Norma IEC.

#### 4. Critérios de ajustes

As unidades temporizadas e instantâneas terão as suas próprias faixas de atuação, sendo que a quantidade de operações para bloqueio do disjuntor será a mesma, independente de que unidade do relé operar. Todos os critérios citados a seguir foram retirados de [3].

- I) Ajuste da corrente de partida ( $Tap$ ) da unidade temporizada de fase, calculada conforme a Eq. (6).

$$a) \frac{I_{carga} \times KF}{RTC} < Tap_{TF} < \frac{I_{cc_{2Fmin}}}{FS \times FI \times RTC} \quad (6)$$

Onde:

$Tap_{TF}$	$Tap$ da unidade temporizada de fase
$I_{carga}$	Corrente de carga do alimentador somada com as correntes necessárias para permitir manobras [A]
$KF$	Fator de aumento da carga para o horizonte de estudo
$RTC$	Relação de transformação de corrente do transformador de corrente (TC);
$I_{cc_{2Fmin}}$	Menor curto-circuito bifásico do trecho protegido pelo disjuntor [A]
$FS$	Fator de segurança que leva em consideração erros envolvidos nos cálculos das correntes de curto-circuito, erros da e erros do relé
$RTC$	
$FI$	Fator de início da curva do relé, definida pelo fabricante;

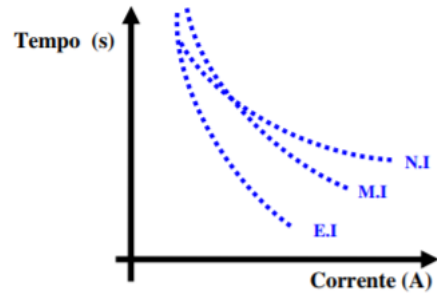


Fig. 3 – Característica de operação dos relés de sobrecorrente temporizados [7]

b) Sempre que possível o  $Tap$  deve ser escolhido para proteger os cabos de saída do alimentador contra possíveis sobrecargas;

c) O  $Tap$  escolhido deve atender as condições “a” e “b” acima e devem permitir a coordenação com outros dispositivos de proteção instalados na rede.

- II) Ajuste da curva da unidade temporizada de fase:

A curva de fase deve ser ajustada de tal forma a garantir coordenação e seletividade com as proteções à jusante e à montante para faltas que não envolvam terra. Os critérios de coordenação e seletividade do relé com outros equipamentos de proteção serão tratados mais adiante no Artigo.

- III) Ajuste do  $Tap$  da unidade instantânea do relé de fase:

O  $Tap$  da unidade instantânea do relé de fase deverá ser ajustado de acordo com a área de atuação desejada. Uma vez escolhida qual a zona de atuação da unidade instantânea, o seu  $Tap$  deverá ser escolhido conforme a Eq. (7) e Eq. (8).

$$a) Tap_{IF} > \frac{I_{inrush}}{RTC} \quad (7)$$

Onde:

$Tap_{IF}$	$Tap$ da unidade instantânea de fase
$I_{inrush}$	Corrente de <i>inrush</i> de todos os transformadores do alimentador [A]
$RTC$	Relação de transformação de corrente do transformador de corrente (TC);

$$b) Tap_{IF} > \frac{I_{cc_{2F}}}{RTC} \quad (8)$$

Onde:

$I_{cc_{2F}}$	Corrente de curto-circuito bifásico no limite da zona de proteção da unidade instantânea [A].
---------------	---

- IV) Ajuste do  $Tap$  da unidade temporizada de terra, calculados conforme a Eq. (9).

$$Tap_{TT} < \frac{I_{CCFTmin}}{RTC \times FI} \quad (9)$$

Onde:

$Tap_{TT}$	Tap da unidade temporizada de terra
$I_{CCFTmin}$	Corrente de curto-circuito fase-terra do final do trecho protegido pelo disjuntor [A]
$FI$	Fator de início da curva

V) Ajuste da curva da unidade temporizada de terra:

A curva de terra deve ser ajustada de tal forma a garantir coordenação e seletividade com as proteções à jusante e à montante para faltas que envolvam terra. Os critérios de coordenação e seletividade do relé com outros equipamentos de proteção serão tratados mais adiante no Artigo.

VI) Ajuste do  $Tap$  da unidade instantânea do relé de terra:

A zona de atuação da unidade instantânea do relé de terra deve ser a mesma que a da unidade instantânea do relé de fase. O  $Tap$  da unidade instantânea de terra é calculado conforme a Eq. (10).

$$Tap_{IT} > \frac{I_{CCFT}}{RTC} \quad (10)$$

Onde:

$Tap_{IT}$	Tap da unidade instantânea de terra
$I_{CCFT}$	Corrente de curto-circuito fase-terra calculada com uma impedância de contato igual a zero [A]
$RTC$	Relação de transformação de corrente no transformador de corrente (TC).

## E. Religadores

### 1. Princípio de Funcionamento

O religador é um dispositivo automático que interrompe e religa um circuito de corrente alternada com uma sequência pré-determinada de abertura e fechamento seguido por uma reinicialização, permanecendo fechado ou bloqueado de acordo com as suas instruções operativas [6].

Na ocorrência de faltas os religadores são sensibilizados por correntes iniciando o ciclo de operação. Caso a sobrecorrente persista a sequência de abertura e fechamento dos contatos é repetida até três vezes consecutivas e, após a quarta abertura, os contatos ficam abertos e bloqueados, isolando a parte defeituosa do sistema [5].

Os religadores são utilizados nas seguintes situações [6]: nos circuitos de saída de alimentadores de subestações de distribuição, em redes de distribuição onde se deseja suprir áreas sujeitas a faltas transitórias, em redes de distribuição após carga cuja continuidade do serviço seja um requisito importante, em circuitos longos onde se deseja criar zonas de proteção através de ajustes apropriados devido às diferenças de níveis de curto-circuito.

Assim como os relés de sobrecorrente, os religadores possuem ajustes de proteção para defeitos de fase e para defeitos de terra.

### 2. Classificação e tipos

Os religadores podem ser classificados quanto ao número de fases – monofásicos e trifásicos, quanto ao tipo de controle – hidráulicos, eletrônicos e microprocessados – e quanto ao meio de interrupção da corrente de curto-circuito – óleo, vácuo ou gás  $SF_6$  [10]. Para o desenvolvimento dos algoritmos de proteção, utilizou-se o religador microprocessado.

### 3. Curvas Características

Os religadores microprocessados oferecem uma vasta opção de curvas tempo vs. corrente para se realizar o ajuste do elemento de sobrecorrente. Tem-se todas as curvas características dos religadores hidráulicos e eletrônicos e mais as curvas características da Norma ANSI e IEC [6], as mesmas curvas de tempo inverso empregadas na realização dos ajustes dos relés de sobrecorrente.

A Fig. 4 apresenta as curvas de operação de fase para os religadores do tipo RX, WV, VW e VVV do fabricante Cooper.

Como nos relés de sobrecorrente, dentro de cada uma das proteções – fase e terra – os religadores possuem dois tipos de curvas: curva rápida (instantânea) e curva lenta (temporizada).

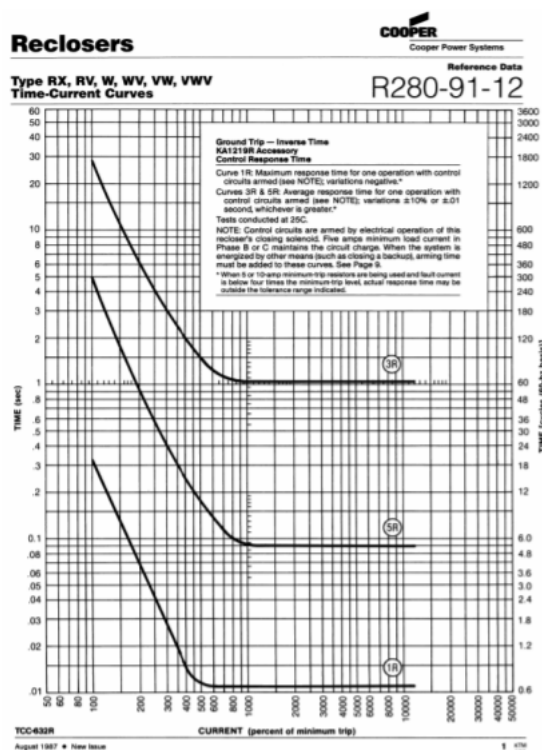


Fig. 4 – Curvas de operação dos religadores [7]

### 4. Critérios de ajustes

Os critérios utilizados neste trabalho para ajuste dos religadores microprocessados são os mesmos utilizados nos relés de sobrecorrente. Além desses critérios, o religador permite a aplicação da filosofia salva fusível, além da queima fusível. Os critérios para o atendimento dessas filosofias são descritos nas subseções de seletividade entre o religador com os demais dispositivos de proteção instalados à jusante.

### F. Seletividade Elo Fusível-Elo Fusível

A seletividade entre dois elos fusíveis em série é garantida se o tempo de interrupção do elo fusível protetor for no máximo 75% do tempo mínimo de fusão do elo protegido [16], conforme ilustra a Fig. 5.

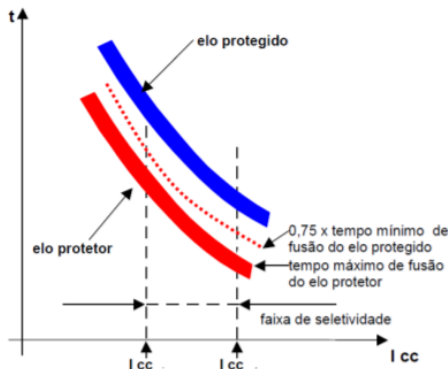


Fig. 5 – Seletividade entre elos fusíveis [17]

### G. Seletividade Relé-Elo Fusível

Para que haja seletividade entre os relés e os elos fusíveis é necessário que o elo fusível interrompa a corrente de defeito antes que o relé opere, conforme Fig. 6.

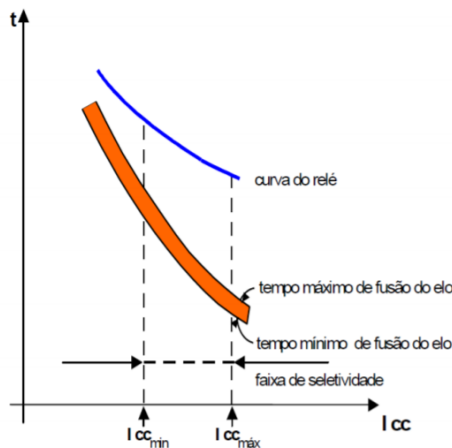


Fig. 6 – Seletividade entre relé e elo fusível [17]

A seletividade é garantida na faixa dos valores de corrente de curto-circuito, na qual exista uma diferença de no mínimo 0,2 segundos entre o tempo máximo de interrupção do elo fusível e o tempo mínimo de operação da curva do relé [10].

### H. Seletividade Elo Fusível-Religador

Normalmente em redes de distribuição não se aconselha a utilização dos elos fusíveis a montante de religadores. Esse tipo de coordenação requer que os tempos de operação rápidas do religador sejam menores que os tempos de fusão do elo em toda a faixa de coordenação, além disso, é necessário que o elo fusível seja capaz de suportar o efeito acumulativo do calor produzido por sucessivas operações do religador no lado da carga [18]. No presente trabalho não será abordada este tipo de configuração, uma vez que não é recomendada.

### I. Seletividade Religador-Elo Fusível

A coordenação considerada aqui é aquela entre um religador e um elo fusível à sua jusante. Para que haja a coordenação entre um religador e um elo fusível, é necessário que o fusível não atue enquanto o religador realiza suas operações rápidas, mas atue durante a primeira operação lenta do religador. Logicamente, o religador deve estar ajustado para operar na curva rápida e a seguir na curva temporizada [3].

A maior corrente em que ocorre a coordenação entre o elo fusível e o religador é obtida do cruzamento da curva de fusão mínima do elo fusível com a curva rápida do religador, multiplicada por um fator  $K$ , que é um fator de segurança no caso em que a sequência de operações do religador tiver uma operação rápida, e um fator de segurança mais um fator que leva em conta o aquecimento do elo fusível quando a sequência de operações tiver duas operações rápidas [3]. A Fig. 7 ilustra a coordenação entre um religador e um elo fusível.

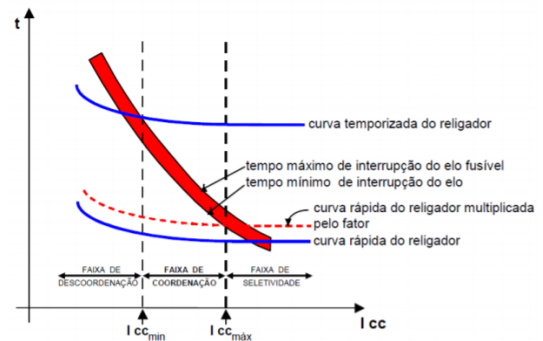


Fig. 7 – Coordenação entre religador e elo fusível [17]

A menor corrente em que ocorre a coordenação é obtida do cruzamento da curva de interrupção máxima do elo fusível e da curva lenta do religador multiplicada por 0,9, para levar em conta os possíveis erros da curva do religador. A coordenação entre o religador e o elo fusível deverá ser verificada para a corrente de curto-circuito fase-terra mínimo do trecho protegido pelos dois dispositivos [3].

### J. Seletividade Relé-Religador

Neste caso, o relé/disjuntor é o dispositivo protegido, enquanto o religador é o dispositivo protetor. Quando um religador de linha está instalado dentro da zona de proteção de um disjuntor, deve-se garantir que os relés de fase e terra que comandam o disjuntor não venham a operar enquanto o religador realiza a sua sequência de operação, até que a falta seja extinta ou até que o religador bloqueie.

### K. Seletividade Religador-Religador

Entre dois religadores instalados em série poderá haver coordenação ou seletividade. Haverá coordenação quando dois religadores quaisquer estiverem em série e ambos operarem juntos na curva instantânea, mas não na temporizada, e haverá seletividade se o religador protegido tiver tempos de atuação maiores que o religador protetor e estiver com a sequência de coordenação ativada, quando então o religador protetor fará a sua sequência de operação, que será acompanhada pelo religador protegido [3].

Para a coordenação entre dois religadores instalados em série deve-se atender os critérios destacados a seguir:

#### I) Coordenação das Curvas Rápidas:

A coordenação entre curvas rápidas raramente é alcançada devido ao reduzido intervalo de tempo entre as curvas, portanto, são possíveis operações simultâneas entre os religadores. A diferença entre os tempos de operação das curvas rápidas dos equipamentos deverá ser igual ou superior a 0,066 segundos, podendo variar de acordo com as características de cada equipamento [10]. A coordenação entre as curvas rápidas de dois religadores é ilustrada na Fig. 8.

#### II) Coordenação das Curvas Lentas:

A coordenação entre curvas lentas é obtida quando a diferença entre os tempos de operação das curvas temporizadas dos equipamentos é superior a 0,2 segundos, sendo ilustrada na Fig. 9 [10].

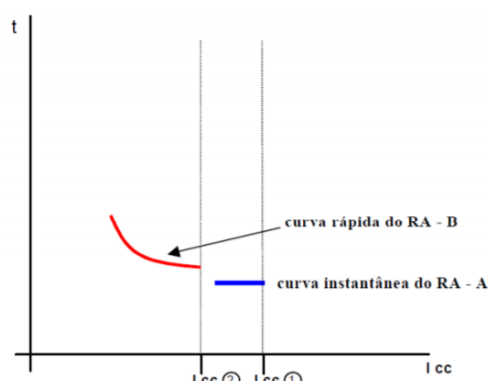


Fig. 8 – Coordenação entre curvas rápidas dos religadores A e B (B é o religador protetor) [17]

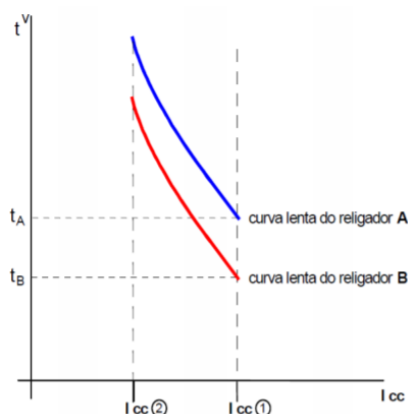


Fig. 9 – Coordenação entre as curvas temporizadas dos religadores A e B (B é o religador protetor) [17]

## IV. METODOLOGIA

A combinação dos algoritmos desenvolvidos forma uma ferramenta computacional capaz de determinar os ajustes das proteções de forma automática, a partir da inserção manual dos dados do circuito (correntes de carga máxima e de curto-circuito, entre outros). Os ajustes são determinados por meio

de algoritmos especializados desenvolvidos para cada um dos dispositivos de proteção, levando em consideração o descrito na fundamentação teórica. No desenvolvimento dos algoritmos, considerou-se como ponto de partida a subestação de um determinado alimentador, indo na direção dos ramais de fim de rede. Dessa forma, pode-se garantir a coordenação e seletividade entre a proteção da subestação e a proteção do início do alimentador, que é um trecho de suma importância.

Para desenvolver os algoritmos e testá-los utilizou-se o *software* NetBeans IDE, uma plataforma que permite o desenvolvimento de aplicações na linguagem de programação Java. Se um algoritmo, obedecendo os critérios mínimos exigidos pela Norma GED-2912 na íntegra, não conseguir obter uma resposta, é feita uma flexibilização de alguns critérios, visando garantir um ajuste adequado para cada dispositivo de proteção.

A estrutura da metodologia proposta é mostrada no fluxograma da Fig. 10.

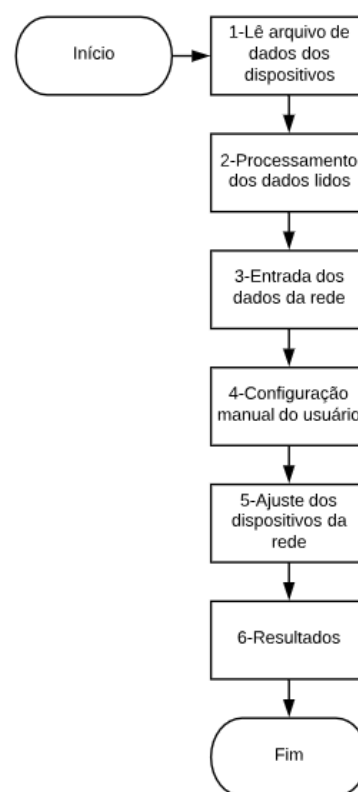


Fig. 10 – Fluxograma da metodologia proposta

### 1. Leitura do arquivo de dados dos dispositivos

Em um primeiro momento, o algoritmo realiza a leitura dos arquivos que possuem as curvas tempo vs. corrente dos dispositivos de proteção. Existem dois métodos para realizar a leitura dessas curvas:

a) Leitura de um conjunto de pontos os quais descrevem a curva: esse método é utilizado para ler as curvas dos elos fusíveis, uma a uma, através de uma matriz com duas colunas, uma representando o tempo e outra coluna representando a corrente correspondente.

b) Armazenar a equação e os parâmetros que descrevem a curva do equipamento: esse método é empregado os relés e religadores.

### 2. Processamento dos dados lidos

Os arquivos de dados lidos anteriormente devem ser ordenados (em vetores, matrizes, etc.) de forma que eles possam ser utilizados pelos algoritmos.

### 3. Entrada dos dados da rede

Nesta etapa, deve-se inserir os dados do trecho da rede elétrica no qual deseja-se que o estudo seja realizado: correntes de carga máxima, correntes de falta fase-terra, trifásica, entre outras.

### 4. Configuração manual do usuário

Após inserir e processar os dados da rede, algumas configurações manuais são solicitadas, como: tipo de elo fusível presente no trecho em estudo (tipo H, K ou tipo T), tempos que garantem a seletividade entre os dispositivos de proteção, tipo de curva do relé ou religador (NI, MI ou EI), etc.

### 5. Ajuste dos dispositivos da rede

Após a realização dos passos anteriores, pode-se dar início ao estudo da proteção. Os algoritmos levarão em consideração os dados da rede elétrica inseridos e as configurações pré-estabelecidas pelo usuário.

a) Identificação do primeiro dispositivo da rede que encontra-se na própria subestação, realizando a proteção da troncal do alimentador;

b) Execução do algoritmo responsável por ajustar o dispositivo identificado em a);

c) Identificação do dispositivo de proteção à jusante;

d) Execução do algoritmo responsável por ajustar e realizar a seletividade do dispositivo identificado em c) com o dispositivo à montante;

e) Execução dos passos c) e d) até que todos os dispositivos de proteção tenham sido ajustados.

Para um melhor entendimento do funcionamento dos algoritmos, alguns pontos importantes são destacados a seguir.

#### • Elos fusíveis

Em algoritmos que se tratam de elos fusíveis, pode-se ajustar um elo fusível como primeiro dispositivo da rede, além de determinar o elo fusível à jusante de um elo fusível, relé ou religador.

Para que o algoritmo não realize testes desnecessários deve-se informar quantos elos fusíveis há à jusante do elo fusível sendo determinado. Dessa forma, se existir um elo fusível à jusante do elo em teste, por exemplo, o algoritmo não testará o elo de menor valor, para que exista um valor disponível para esse elo que encontra-se à jusante. Limitou-se que o valor inserido para o número de elos fusíveis à jusante deve ser no máximo três, levando em consideração que em

uma rede de distribuição de energia há no máximo três elos fusíveis consecutivos, conforme recomendação técnica.

Além disso, após determinar os ajustes do religador para a filosofia salva fusível ou queima fusível e identificar a presença de um elo fusível à jusante, pode-se ajustar as curvas do elo para qualquer uma dessas filosofias.

Como dito anteriormente no presente Artigo, os algoritmos buscam encontrar soluções utilizando os critérios previstos em normativa, e caso nenhum resultado seja obtido, o algoritmo deve executar a rotina novamente, aderindo algumas flexibilizações. As flexibilizações realizadas envolvem qualquer algoritmo em que se deseja obter ajustes para o elo fusível, seja o mesmo o primeiro dispositivo da rede ou esteja à jusante de um religador, relé ou de outro elo fusível.

As flexibilizações realizadas são:

1. Utilização da corrente fase-terra mínima de proteção de primária no lugar da fase-terra mínima de proteção de retaguarda.
2. Utilização da corrente fase-terra máxima no local do dispositivo ao invés de utilizar corrente trifásica.
3. As duas flexibilizações citadas acima implementadas ao mesmo tempo.

#### • Relé/Religador

Nos algoritmos responsáveis por ajustar um relé ou religador como primeiro dispositivo da rede, determina-se os ajustes para a curva de fase e terra: ajuste do *Tap* (AC) e ajuste do multiplicador de tempo (AT) do relé/reliador. Para isso, uma função de aptidão (FA) foi implementada no algoritmo do relé/reliador, com o objetivo de encostar a curva de fase e de terra o mais próximo possível dos tempos limites de atuação da proteção primária e de retaguarda definidos pelo usuário. A FA é responsável por calcular o somatório das diferenças quadráticas entre os tempos limitantes e os tempos correspondentes da curva do relé/reliador para as respectivas correntes.

Inicialmente, realiza-se o cálculo das diferenças quadráticas, conforme a Eq. (11) e Eq. (12).

$$\Delta_1 = (t_1 - t_0)^2 \quad (11)$$

$$\Delta_2 = (t_2 - t_3)^2 \quad (12)$$

Onde:

$\Delta_1$	Diferença quadrática entre $t_1$ e $t_0$ .
$\Delta_2$	Diferença quadrática entre $t_2$ e $t_3$ .
$t_1$	Tempo limite para proteção de retaguarda.
$t_0$	Tempo correspondente à curva do relé/reliador para a corrente mínima de proteção de retaguarda.
$t_2$	Tempo limite para proteção primária.
$t_3$	Tempo correspondente à curva do relé/reliador para a corrente mínima de proteção primária.

Quando a função é aplicada para encontrar os ajustes da curva de terra do relé/reliador, a corrente utilizada é a fase-

terra mínima. Quando se trata dos ajustes de fase, a corrente é a bifásica mínima.

A partir de  $\Delta_1$  e  $\Delta_2$ , obtêm-se a Função de Aptidão, conforme a Eq. (13).

$$FA = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (13)$$

Onde:

$FA$  Resultado do somatório das diferenças quadráticas

A Função de Aptidão mostrada é aplicada em todas as possíveis combinações de AC e AT para todos os tipos de curvas (NI, MI e EI) do relé/religador, até que se identifique a configuração que apresenta o menor valor de FA para cada tipo de curva.

Além dos ajustes com menor resultado na FA, todos os ajustes possíveis para as curvas do relé/religador são retornados como resultado do algoritmo, podendo ser utilizados caso os ajustes com menor FA não satisfizerem as condições para seletividade com os demais dispositivos à jusante.

#### • Relé

Em algoritmos que envolvem relés, os ajustes de fase e terra são realizados conforme a filosofia queima fusível, permitindo ajustar um relé como primeiro dispositivo da rede elétrica e à jusante de outro relé ou religador.

#### • Religador

Em algoritmos para determinar os ajustes de fase e terra do religador, pode-se optar pela filosofia queima fusível ou salva fusível, permitindo, para ambas as filosofias: ajustar um religador como primeiro dispositivo da rede elétrica e ajustar um religador à jusante de um relé ou de outro religador.

### 6. Resultados

Os resultados são emitidos na forma de pequenos relatórios informando sobre os ajustes calculados. Devido as flexibilizações que os algoritmos possuem, quando alguma flexibilização é realizada, a mesma é informada no resultado final.

## V. RESULTADOS

Os algoritmos foram testados na rede de distribuição da Fig. 11. As etapas que compõe o estudo de proteção são conforme o fluxograma da Fig. 10.

### 1. Leitura do arquivo de dados dos dispositivos

Realiza-se a leitura das curvas tempo vs. corrente dos elos fusíveis (através de um arquivo texto com um conjunto de pontos) e dos religadores (através de equações).

### 2. Processamento dos dados lidos

Algoritmo processa os arquivos texto lidos anteriormente, transformando-os em matrizes para que possam ser utilizados

pelos algoritmos. As curvas dos religadores são utilizadas através de equações que foram inseridas anteriormente.

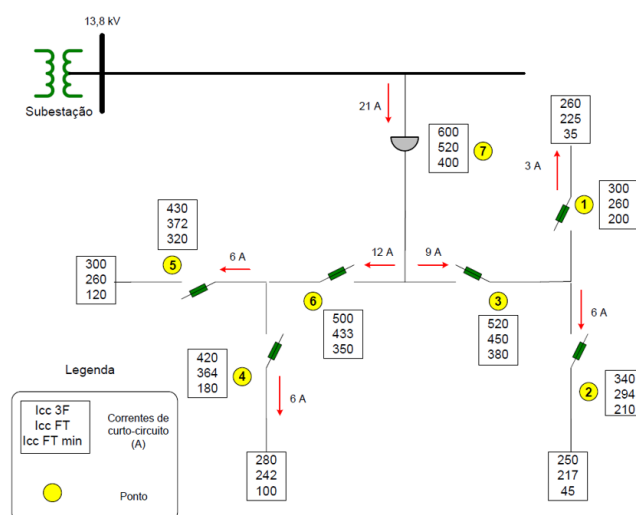


Fig. 11 – Rede utilizada nos estudos

### 3. Entrada de dados da rede

Nessa etapa, insere-se os dados da rede pertinentes ao trecho em estudo, que nesse caso refere-se ao primeiro dispositivo identificado na rede:

- Corrente de carga máxima: 21 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 600 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 520 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 180 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 260 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 350 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 433 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 520 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 450 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 450 A

A corrente de *inrush* não foi considerada nos testes, pois na rede em consideração não se conhece a quantidade e potência de transformadores instalados.

### 4. Configuração manual do usuário

Para a execução do algoritmo que determina os ajustes do religador, é necessário realizar as configurações dos parâmetros das curvas do religador (ver Eq. (5)), mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros da curva do religador

Curva	A	B	P
NI	0,14	0	0,02
MI	13,5	0	1
EI	80	0	2

Para estudos da seletividade do religador com elos fusíveis à jusante que serão realizados posteriormente, pode-se definir o tempo que garante a seletividade entre o religador e os elos fusíveis como sendo 0,1 s.

### 5. Ajustes dos dispositivos da rede

Como o primeiro dispositivo da rede é um religador, pode-se realizar o estudo da rede através de duas filosofias: queima fusível e salva fusível. No presente Artigo serão abordadas ambas as filosofias, mostrando os resultados em separado.

#### • Filosofia queima fusível

a) Identificação do primeiro dispositivo da rede: religador.

b) Execução do algoritmo para determinar os ajustes das curvas do religador. Os resultados de ajustes para as curvas lentas de fase e terra que possuem menor resultado na FA são mostrados nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Ajustes da curva lenta de fase

Curva Lenta	AC (A)	AT (s)	FA
EI	87	0,99	2,782
MI	111	0,99	0,156
NI	155	0,74	0,001

Tabela 3 – Ajustes da curva lenta de terra

Curva Lenta	AC (A)	AT (s)	FA
EI	44	0,98	1,540
MI	49	0,99	0,105
NI	92	0,48	0,001

Para as curvas rápidas utilizou-se a característica instantânea, onde o tempo será constante: 0,1 segundos.

Ajustes da curva rápida do religador:

- AC da curva rápida de fase: 451 A
- AC da curva rápida de terra: 451 A
- AT da curva rápida de fase e terra: 0,1 s

Em ambos os casos o menor FA é o da curva NI, portanto essa curva será utilizada nos estudos de seletividade com os dispositivos à jusante do religador.

Para mostrar a efetividade dos resultados obtidos na FA implementada no algoritmo, as Tabelas 4 e 5 trazem os valores dos tempos limites para atuação da proteção definidos pelo usuário e as correntes de proteção primária e de retaguarda, utilizadas no cálculo da FA.

Tabela 4 – Tempos e correntes de fase utilizados na FA

Curva de fase	
Tempos limites (s)	
Proteção primária	Proteção retaguarda
5	10
Correntes bifásicas mínimas (A)	
Proteção primária	Proteção retaguarda
433	260

Tabela 5 – Tempos e correntes de terra utilizados na FA

Curva de terra	
Tempos limites (s)	
Proteção primária	Proteção retaguarda
2,5	5
Correntes fase-terra mínimas (A)	
Proteção primária	Proteção retaguarda
350	180

Utilizando os valores informados nas Tabelas 4 e 5 e os ajustes com menor resultado na FA das curvas de fase e terra (Tabela 2 e 3), implementou-se o gráfico da Fig. 12. Os asteriscos representam os pontos de correspondentes aos tempos configurados pelo usuário e a corrente correspondente (de proteção primária ou retaguarda). Os resultados observados a partir do gráfico são mostrados na Tabela 6.

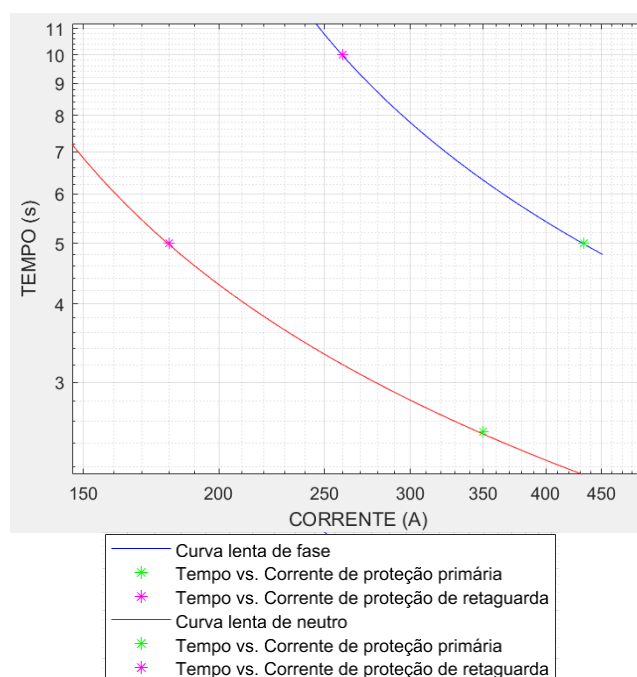


Fig. 12 – Gráfico com os resultados da FA

Tabela 6 – Resultados da FA

Curva	Tempos	Proteção	Valor (s)
Fase	Configurado	Primária	5
		Retaguarda	10
	Obtidos	Primária	4,9906
		Retaguarda	9,9626
Terra	Configurado	Primária	2,5
		Retaguarda	5
	Obtidos	Primária	2,4812
		Retaguarda	4,9726

Nota-se que os tempos obtidos praticamente encostam na curva do religador mas ainda assim permanecem abaixo dos tempos limitantes, mostrando a efetividade da função implementada.

c) Identificação do dispositivo de proteção à jusante do religador: elo fusível 6.

d) Após a obtenção dos ajustes das curvas do religador, deseja-se determinar o elo fusível 6. Inicialmente, altera-se os dados do circuito, inserindo os dados pertinentes ao novo trecho estudado:

Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 12 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 500 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 433 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 100 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 242 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 180 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 364 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 430 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 372 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 372 A

Deve-se inserir no algoritmo os ajustes obtidos anteriormente para o religador:

- AT da curva lenta de fase: 0,74 s
- AC da curva lenta de fase: 155 A
- AC da curva rápida de fase: 451 A
- AT da curva lenta de terra: 0,48 s
- AC da curva lenta de terra: 92 A
- AC da curva rápida de terra: 451 A

Após inserir os dados do circuito e realizar os ajustes necessários, executa-se o algoritmo que determina um elo fusível à jusante do religador. Para o elo 6 obteve-se o valor 25K como resultado, não sendo necessária a flexibilização nenhum critério de seletividade. Para uma melhor visualização da obtenção da seletividade, as curvas foram plotadas no *software* MATLAB, e são mostradas na Fig. 13.

Percebe-se, através do gráfico, a obtenção da seletividade, uma vez que o critério da subseção I da Fundamentação Teórica foi atendido. A corrente de ajuste da unidade rápida está contida na zona de proteção primária do religador, portanto, o elo fusível não enxerga essa corrente. Nota-se também que, como característica da curva rápida, ao chegar no valor do ajuste de corrente da curva rápida, o tempo de atuação cai, ficando fixo em 0,1 s.

e) Deve-se repetir as rotinas c) e d) até determinar todos os dispositivos da rede.

c1) Após determinar o elo fusível 6, altera-se os dados do circuito para determinar o elo fusível 3.

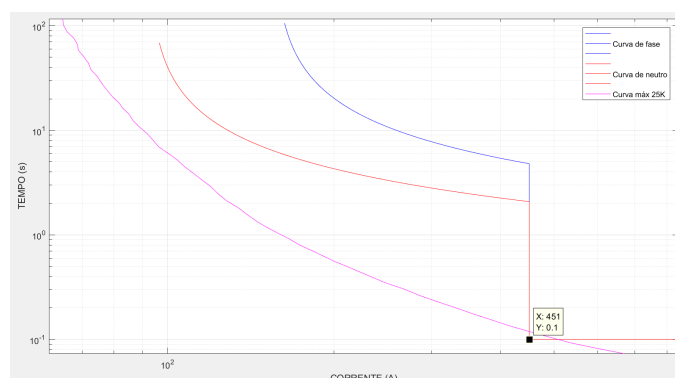


Fig. 13 – Seletividade entre religador e elo fusível 6 para filosofia queima fusível

d1) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 9 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 520 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 450 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 35 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 217 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 210 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 260 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 340 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 294 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 294 A

Deve-se inserir no algoritmo os ajustes obtidos anteriormente para o religador:

- AT da curva lenta de fase: 0,74 s
- AC da curva lenta de fase: 155 A
- AC da curva rápida de fase: 451 A
- AT da curva lenta de terra: 0,48 s
- AC da curva lenta de terra: 92 A
- AC da curva rápida de terra: 451 A

Após alterar os dados do circuito e realizar os ajustes necessários, executa-se o algoritmo que determina um elo fusível à jusante do religador, onde obteve-se o elo de 40K como resultado, flexibilizando a corrente fase-terra mínima de proteção de retaguarda para fase-terra mínima de proteção primária. Para uma melhor visualização da obtenção da seletividade, as curvas foram plotadas no *software* MATLAB, e são mostradas na Fig. 14.

Uma vez que o elo fusível possui um tempo de atuação menor do que o religador a partir de 159 A, sendo esse valor menor do que a corrente fase-terra mínima vista pelo elo (200 A), percebe-se que a seletividade foi garantida. A corrente de ajuste da unidade rápida está contida na zona de proteção primária do religador, portanto, o elo fusível não enxerga essa corrente. Nota-se também que, como característica da curva rápida, ao chegar no valor do ajuste de corrente da curva rápida, o tempo de atuação cai, ficando fixo em 0,1 s.

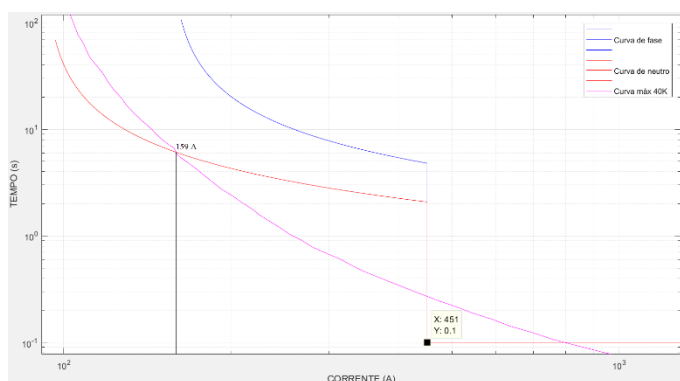


Fig. 14 – Seletividade entre religador e elo fusível 3 para filosofia queima fusível

c2) Identificação do dispositivo à jusante do elo fusível 6: elo fusível 5.

d2) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 6 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 430 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 372 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 120 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 260 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 120 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 260 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 300 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 260 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 260 A

Após a alteração dos dados da rede e informar o valor do elo fusível 6 encontrado anteriormente, executa-se o algoritmo responsável por determinar um elo fusível à jusante de um elo fusível. Nenhum elo foi retornado como resultado, apesar de flexibilizar a corrente fase-terra mínima de proteção de retaguarda para fase-terra mínima de proteção primária no ajuste do elo e também flexibilizar o critério da seletividade, utilizando a corrente fase-terra máxima no local do dispositivo ao invés da corrente trifásica.

Analisando o algoritmo passo a passo, percebe-se que nenhum elo é encontrado pois ocorre a perda da seletividade antes de 430 A (seletividade já flexibilizada para fase-terra máxima). Analisando graficamente através da Fig. 15, percebe-se que, para o elo de 10K, a seletividade ocorre até 366 A, não garantindo seletividade para todo trecho, porém, protegendo boa parte dele.

c3) Da mesma forma que no passo anterior, deve-se determinar agora o elo fusível 4.

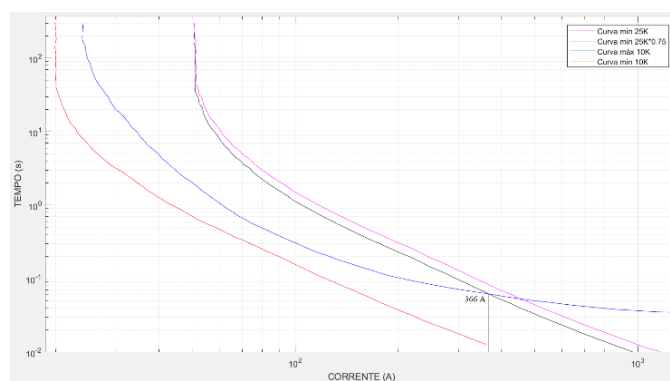


Fig. 15 - Seletividade elo fusível 6 e elo fusível 5

d3) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 6 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 420 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 364 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 100 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 242 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 100 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 242 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 280 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 242 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 242 A

Após a alteração dos dados da rede e informar o valor do elo fusível 6 encontrado anteriormente, executa-se o algoritmo responsável por determinar um elo fusível à jusante de um elo fusível. O resultado foi o elo de 10K, flexibilizando o critério da seletividade, utilizando a corrente fase-terra máxima no local do dispositivo ao invés da corrente trifásica.

c4) Após determinar os elos fusíveis à jusante do elo 6, pode-se determinar os elos fusíveis que estão à jusante do elo fusível 3. Inicialmente, deseja-se determinar o elo fusível 1.

d4) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 3 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 300 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 260 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 35 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 225 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 35 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 225 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 260 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 225 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 225 A

Após a alteração dos dados da rede e informar o valor do elo fusível 5 encontrado anteriormente, executa-se o algoritmo responsável por determinar um elo fusível à jusante de um elo fusível. O elo retornado foi o elo de 10K, sem a necessidade de flexibilização de nenhum critério.

c5) Deve-se determinar agora o último dispositivo da rede, o elo fusível 2.

d5) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 6 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 340 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 294 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 45 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 217 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 45 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 217 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 250 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 217 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 217 A

Após a alteração dos dados da rede e informar o valor do elo fusível 5 encontrado anteriormente, executa-se o algoritmo responsável por determinar um elo fusível à jusante de um elo fusível. O resultado foi o elo de 15K, sem necessidade de flexibilização de critérios.

#### • Filosofia salva fusível

a) Identificação do primeiro dispositivo da rede: religador.

b) Execução do algoritmo para determinar os ajustes das curvas do religador. Os resultados de ajustes para as curvas lentas de fase e terra que possuem menor resultado na FA são mostrados nas tabelas 7, 8, 9 e 10.

Tabela 7 – Ajustes da curva lenta de fase

Curva Lenta	AC (A)	AT (s)	FA
EI	87	0,99	2,782
MI	111	0,99	0,156
NI	155	0,74	0,001

Tabela 8 – Ajustes da curva lenta de terra

Curva Lenta	AC (A)	AT (s)	FA
EI	44	0,98	1,540
MI	49	0,99	0,105
NI	92	0,48	0,001

Tabela 9 – Ajustes da curva rápida de fase

Curva Rápida	AC (A)	AT (s)	FA
EI	87	0,1	--
MI	111	0,1	--
NI	155	0,1	--

Tabela 10 – Ajustes da curva rápida de terra

Curva Rápida	AC (A)	AT (s)	FA
EI	44	0,1	--
MI	49	0,1	--
NI	92	0,1	--

Para essa filosofia, utilizou-se curvas com característica inversa para expressar tanto as curvas lentas, como as curvas rápidas.

Ambas as curvas lentas o menor FA é o da curva NI, portanto essa curva será utilizada nos estudos de seletividade com os dispositivos à jusante do religador.

c) Identificação do dispositivo de proteção à jusante do religador: elo fusível 6.

d) Após a obtenção dos ajustes das curvas do religador, deseja-se determinar o elo fusível 6. Inicialmente, altera-se os dados do circuito, inserindo os dados pertinentes ao novo trecho estudado:

Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 12 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 500 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 433 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 100 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 242 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 180 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 364 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 430 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 372 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 372 A

No início da execução desse algoritmo, encontrou-se dificuldades em obter uma curva rápida seletiva utilizando os ajustes do religador com menor FA (Tabelas 7, 8, 9 e 10). Por isso, além dos ajustes com menor FA, utilizou-se, para a curva de fase, outros ajustes retornados como resultado, que são mostrados abaixo.

- AT da curva lenta de fase: 0,99 s
- AC da curva lenta de fase: 109 A
- AC da curva rápida de fase: 109 A
- AT da curva rápida de fase: 0,1 S
- AT da curva lenta de terra: 0,48 s
- AC da curva lenta de terra: 92 A
- AC da curva rápida de terra: 92 A
- AT da curva rápida de terra: 0,1 s

Executando o algoritmo que determina para determinar o elo fusível 6, obteve-se o elo de 65K como resultado. Para uma melhor visualização da obtenção da seletividade entre o elo de 65K com as curvas de fase do religador, observa-se a Fig. 16.

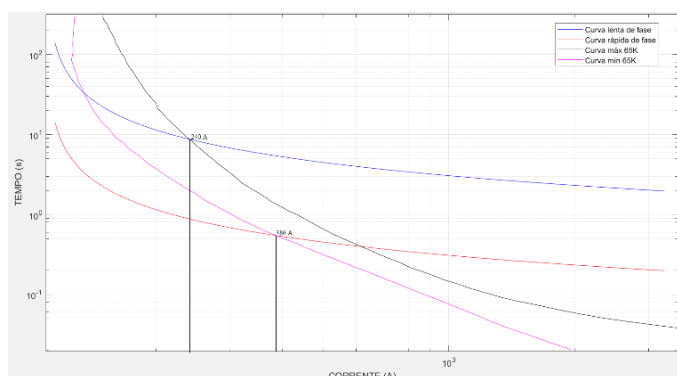


Fig. 16 - Seletividade entre religador e elo fusível 6 para curvas de fase

Em uma breve análise, nota-se que a curva máxima de interrupção do elo fusível é seletiva curva lenta do religador para correntes a partir de 240 A, satisfazendo a necessidade de seletividade a partir da corrente bifásica mínima, que é de 364 A. Quanto a curva de mínima fusão do elo fusível, deveria ser seletiva com a curva rápida do religador até a corrente trifásica máxima (430 A), porém a seletividade ocorre até 386 A, deixando um pequeno trecho desprotegido, mas garantindo seletividade para grande parte dele.

No caso das curvas de terra do religador, a obtenção da seletividade com o elo de 65K pode ser vista na Fig. 17.

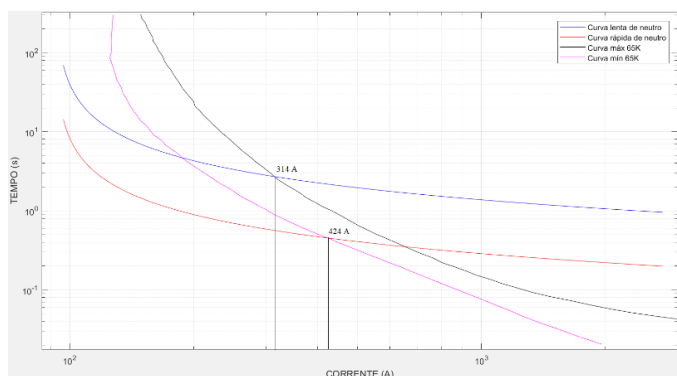


Fig. 17 - Seletividade entre religador e elo fusível 6 para curvas de terra

Observando o gráfico, nota-se que a curva rápida é seletiva com a curva de mínima fusão do elo fusível para correntes até 424 A, quando enxergar até a fase-terra máxima (372 A) seria suficiente.

Nesse caso, para a curva lenta, abre-se mão da corrente fase-terra mínima, utilizando 320 A ao invés de 180 A (ver Fig. 11). Observa-se que a curva de máxima interrupção do elo fusível é seletiva com a curva lenta do religador para correntes a partir de 314 A, satisfazendo a seletividade com a corrente fase-terra mínima.

e) Da mesma forma que para a filosofia queima fusível, deve-se repetir as rotinas c) e d) até determinar todos os dispositivos da rede.

c1) Após determinar o elo fusível 6, altera-se os dados do circuito para determinar o elo fusível 3.

d1) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 9 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 520 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 450 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 35 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 217 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 210 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 260 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 340 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 294 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 294 A

Deve-se inserir no algoritmo os ajustes obtidos anteriormente para o religador, que devem ser os mesmos utilizados para encontrar o elo fusível 6:

- AT da curva lenta de fase: 0,99 s
- AC da curva lenta de fase: 109 A
- AC da curva rápida de fase: 109 A
- AT da curva rápida de fase: 0,1 S
- AT da curva lenta de terra: 0,48 s
- AC da curva lenta de terra: 92 A
- AC da curva rápida de terra: 92 A
- AT da curva rápida de terra: 0,1 s

Executando o algoritmo que determina um elo fusível à jusante do religador para a filosofia salva fusível, obteve-se o elo de 40K como resultado. Para uma melhor visualização da obtenção da seletividade entre o elo de 40K com as curvas de fase do religador, observa-se a Fig. 18.

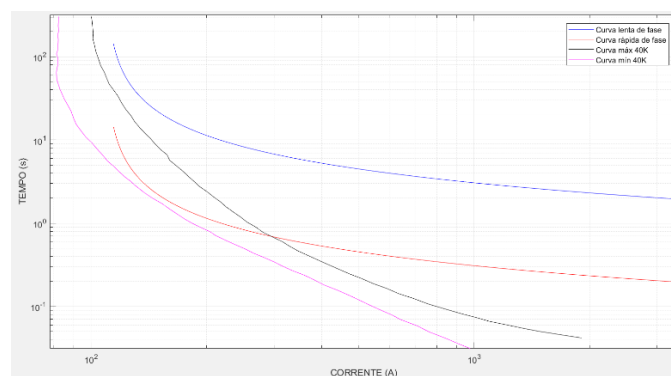


Fig. 18 - Seletividade entre religador e elo fusível 3 para curvas de fase

Percebe-se que a curva de máxima interrupção do elo fusível é seletiva curva lenta do religador para qualquer valor de corrente. Nota-se que não foi possível obter a seletividade da curva rápida do religador com a curva de mínima fusão do elo fusível, uma vez que independentemente do valor da corrente de falta o elo fusível sempre terá um tempo de atuação menor.

No caso das curvas de terra do religador, a obtenção da seletividade com o elo de 40K pode ser vista na Fig. 19.

Observando o gráfico, nota-se que a curva rápida é seletiva com a curva de mínima fusão do elo fusível para correntes entre 98 A e 182 A, não satisfazendo a seletividade – entre a fase-terra mínima de seletividade, 210 A, e fase-terra máxima de seletividade, 294 A.

Nesse caso, para a curva lenta, observa-se que a curva de máxima interrupção do elo fusível é seletiva com a curva lenta do religador para correntes a partir de 159 A, satisfazendo a seletividade com a corrente fase-terra mínima.

c2) Identificação do dispositivo à jusante do elo fusível 6: elo fusível 5.

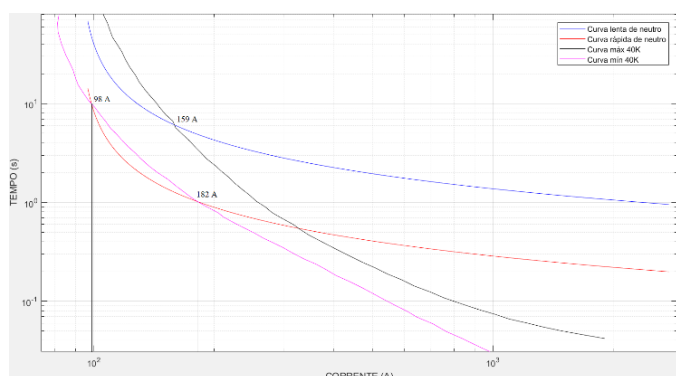


Fig. 19 - Seletividade entre religador e elo fusível 3 para curvas de terra

d2) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 6 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 430 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 372 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 120 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 260 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 120 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 260 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 300 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 260 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 260 A

Após informar o valor do elo fusível 6 encontrado anteriormente, executa-se o algoritmo responsável por determinar um elo fusível à jusante de um elo fusível, sendo retornado o elo de 40K, não necessitando realizar nenhuma flexibilização.

c3) Da mesma forma que no passo anterior, deve-se determinar agora o elo fusível 4.

d3) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 6 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 420 A

- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 364 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 100 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 242 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 100 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 242 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 280 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 242 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 242 A

Após informar o valor do elo fusível 6 encontrado anteriormente, executa-se o algoritmo responsável por determinar um elo fusível à jusante de um elo fusível, sendo retornado o elo de 25K, utilizando critérios sem nenhuma flexibilização.

c4) Após determinar os elos fusíveis à jusante do elo 6, pode-se determinar os elos fusíveis que estão à jusante do elo fusível 3. Inicialmente, deseja-se determinar o elo fusível 1.

d4) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 3 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 300 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 260 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 35 A
- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 225 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 35 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 225 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 260 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 225 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 225 A

Após informar o valor do elo fusível 5 encontrado anteriormente, executa-se o algoritmo responsável por determinar um elo fusível à jusante de um elo fusível. Como o elo fusível é o mesmo utilizado na filosofia queima fusível e os dados do circuito são iguais, o elo de 10K é retornado como resultado, não necessitando realizar nenhuma flexibilização.

c5) Deve-se determinar agora o último dispositivo da rede, o elo fusível 2.

d5) Dados da rede pertinentes ao trecho em estudo:

- Corrente de carga máxima: 6 A
- Corrente máxima de curto-circuito (no ponto do dispositivo): 340 A
- Corrente fase-terra máxima (no ponto do dispositivo): 294 A
- Corrente fase-terra mínima no limite do alcance do dispositivo: 45 A

- Corrente bifásica mínima no limite do alcance do dispositivo: 217 A
- Corrente fase-terra mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 45 A
- Corrente bifásica mínima vista pelo dispositivo para obtenção da seletividade: 217 A
- Corrente trifásica máx. vista pelo dispositivo: 250 A
- Corrente fase-terra máx. vista pelo dispositivo: 217 A
- Corrente bifásica máx. vista pelo dispositivo: 217 A

Após informar o valor do elo fusível 5 encontrado anteriormente, executa-se o algoritmo responsável por determinar um elo fusível à jusante de um elo fusível. Como o elo fusível é o mesmo utilizado na filosofia queima fusível e os dados do circuito são iguais, o elo de 15K é retornado como resultado, não necessitando realizar nenhuma flexibilização.

A Tabela 11 mostra os resultados obtidos para os elos fusíveis da rede estudada, de forma a ilustrar a importância da flexibilização dos critérios de seletividade.

Tabela 11 – Resultados dos algoritmos

Elos fusíveis	Filosofia	Resultado
Elo 6	Queima fusível	25K
	Salva fusível	65K*
Elo 3	Queima fusível	40K*
	Salva fusível	40K*
Elo 5	Queima fusível	10K*
	Salva fusível	40K
Elo 4	Queima fusível	10K*
	Salva fusível	25K
Elo 1	Queima fusível	10K
	Salva fusível	10K
Elo 2	Queima fusível	15K
	Salva fusível	15K

Todos os resultados que possuem o asterisco representam resultados onde houve a necessidade de flexibilização de algum critério para a obtenção da seletividade com o dispositivo à montante. Nota-se que, caso não houvesse flexibilização de alguns critérios, os elos iniciais – elo fusível 6 e 3 – não seriam definidos, e consequentemente não seria possível realizar os estudos do restante da rede.

## VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento dos algoritmos utilizando critérios de coordenação e seletividade estabelecidos pelo GED-2912 possibilitou a realização de testes e a obtenção de resultados na forma de ajustes para os dispositivos de proteção. A partir dos resultados obtidos, percebeu-se que muitas vezes não é possível ajustar um dispositivo utilizando os critérios previstos em normativa. No caso de os critérios serem necessariamente respeitados, em algumas situações nenhum ajuste é encontrado para o dispositivo em estudo. De forma a reverter essa situação, pensou-se na implementação de algumas flexibilizações de critérios, citados anteriormente na subseção 5 da Metodologia.

A geração dos coordenogramas no *software* MATLAB permitiu observar que as coordenações e seletividades entre os dispositivos estudados ocorreram de forma efetiva, permitindo a inspeção visual dos ajustes e o quanto foi perdido da coordenação e seletividade no caso de alguma flexibilização.

Foi destinado um tempo considerável em testes, melhorias e flexibilizações nos algoritmos. Dessa forma, não foi possível realizar a integração entre o banco de dados com as rotinas de varredura de rede e execução automática dos algoritmos de proteção. Da mesma forma, não foi possível gerar o coordenograma através do NetBeans IDE. Como proposta de futuros trabalhos, além da integração do banco de dados e da geração de coordenograma, pode-se integrar essas ferramentas em uma interface adequada, que permitirá a importação automática da topologia de rede, das correntes de carga, dados do sistema de proteção, etc., tornando os estudos de proteção em sistemas de distribuição mais simples de serem realizados.

## REFERÊNCIAS

- [1] SHORT, T.A. "Electric Power Distribution Handbook." CRC Press LLC, New York, 2004.
- [2] FERREIRA, G.D. "Otimização da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Uma Abordagem Considerando a Seleção e Alocação de Dispositivos de Proteção e Manobras." Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- [3] CPFL, "CPFL GED-2912, 'Proteção de Redes Aéreas de Distribuição – Sobrecorrente,'" 2016.
- [4] L. BLACKBURN, T.J. DOMIN, "Protective Relaying: Principles and Applications," 3rd edn. (CRC Press, 2006).
- [5] Coleção Distribuição de Energia Elétrica, Vol 2 – Eletrobrás. "Proteção de Sistemas Aéreas de Distribuição." Ed. Campus, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1ª edição, 1982.
- [6] PEREIRA, D.R. "Um Sistema de Software para Execução de Estudos de Coordenação e Seletividade em Sistemas de Distribuição." Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- [7] COMASSETTO, L. "Desenvolvimento de Algoritmos para Otimização da Confiabilidade de Redes de Distribuição." Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.
- [8] PARADELO JUNIOR, R.C. "Proteção de Sobrecorrente em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica através de Abordagem Probabilística." Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [9] ELETROPAULO, Norma Técnica ND – 3.001 – "Proteção de Redes de Distribuição Aérea Primária." 2004.
- [10] SANTOS, R.A., "Proteção contra Sobrecorrentes em Redes de Distribuição Aéreas de 13,8 kV: Análise do desempenho do sistema atual e propostas para melhoria." Monografia de Especialização, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFGM – Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- [11] IEEE, "IEEE Std C37.41, 'IEEE Standard Design Tests for High-Voltage (>1000 V) Fuses and Accessories,'" 2016.
- [12] CELESC, E-313.0015. "Elos Fusíveis de Distribuição," 2004.
- [13] CEMIG, ND-4.15. "Proteção de Sobrecorrentes do Sistema de Distribuição de Média Tensão da Cemig." 2017.
- [14] IEC 60255-22-3, I.T. Ed. 2.0 b:2000, "Electrical Relays – Part 22-3: 'Electrical Disturbance Tests for Measuring Relays and Protection Equipment – Radiated Electromagnetic Field Disturbance Tests.'" American National Standards Institute (ANSI), 2007.
- [15] LEDESMA, J.J.G. "Uma Metodologia para Análise da Coordenação e Seletividade da Proteção de Sistemas de Distribuição." Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

- [16] ABNT, "ABNT NBR 7282. 'Dispositivos fusíveis de alta tensão – Dispositivos tipo expulsão – Requisitos e métodos de ensaio,'" 2011.
- [17] COPEL, MIT – 162503. "Manual de Instruções Técnicas: 'Proteção de Sobrecorrente para Sistemas de Distribuição,'" 2009.
- [18] GIGUER, S. "Proteção de Sistemas de Distribuição." Porto Alegre: SAGRA, 1988.
- [19] CARDOSO, G. JR., FERREIRA, G. D. "Apostila de Dispositivos de Proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos de distribuição." V 1.12, 2009.