



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FRANCISCO WATSON OLIVEIRA CAVALCANTE JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE INTERATIVO PARA COORDENAÇÃO DE
SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

FORTALEZA

2019

FRANCISCO WATSON OLIVEIRA CAVALCANTE JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE INTERATIVO PARA COORDENAÇÃO DE
SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Carlos Gustavo Castelo
Branco

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C364d Cavalcante Júnior, Francisco Watson Oliveira.
Desenvolvimento de software interativo para coordenação de sistemas de proteção de redes de distribuição /
Francisco Watson Oliveira Cavalcante Júnior. – 2019.
79 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Me. Carlos Gustavo Castelo Branco.
1. Redes Elétricas de Distribuição. 2. Proteção de Redes Elétricas. 3. Proteção Coordenada. 4.
Proteção Seletiva. I. Título.

CDD 621.3

FRANCISCO WATSON OLIVEIRA CAVALCANTE JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE INTERATIVO PARA COORDENAÇÃO DE
SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Gustavo Castelo Branco (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Lucas Mateus Cordeiro Jurema
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A todos aqueles que acreditam na Educação Pública de qualidade como o elemento de transformação, mobilidade e revolução social.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Carlos Gustavo Castelo Branco por me orientar nesse trabalho final de curso, pela compreensão com os prazos apertados e os conselhos que me permitiram apresentá-lo da melhor maneira possível.

Ao Prof. Raimundo Furtado Sampaio, pela orientação no projeto de iniciação científica Jovens Talentos para a Ciência, que me permitiu participar dos projetos do GREI, conhecer (e me apaixonar pelo) Python. Agradecê-lo também pela disposição para participar da banca.

Ao Eng. Lucas Mateus Cordeiro Jurema, pelo tempo disponibilizado para me apresentar o MyGrid e para participar da banca, assim como pela amizade durante a graduação.

Aos meus pais, Antônia e Watson, que me ensinaram a ter persistência em meio a qualquer dificuldade e a agarrar toda oportunidade como se fosse a última.

Aos meus irmãos e melhores amigos, Raul, Rafael e Gabriel, para quem eu tinha que ser exemplo e que são hoje meus maiores orgulhos.

Aos amigos de UFC, Adrielly Maria, João Murilo, Yasmim Pereira, Danielle Baltazar, Caroline Fontão, Suzane Carvalho, Jonas Pinheiro, Lucas Félix, Yuri Souza, Lúcio Sérgio, Stenio Filho, Elvis Johnson, Tito Livio, Matheus Machado, Ramon Gaspar, Arnold Almeida, Judá Santos e tantos outros cuja amizade foi reforçada a cada prova e trabalho.

A toda equipe do GREI, em especial aos Prof. Lucas, Prof^a. Ruth, Matheus Ferreira e Felipe Sampaio que com muita generosidade compartilharam tempo, conhecimentos e técnicas sem os quais eu não poderia ter construído esse e tantos outros trabalhos.

Aos meus amigos mais antigos, Lo-Ruama Amaro, Joélia Rodrigues, Daniel Filho, Morgana Gomes, Yuri Ramos, Thiago Fernandes e Ellen Valentim, que mesmo em meio aos desencontros, ainda conseguimos manter o carinho e o contato.

Aos Presidentes Luiz Inácio Lula da Silva e Dilma Vana Rousseff, pelas políticas focadas na valorização do ensino técnico e superior, sem as quais eu não teria oportunidade de acesso à Universidade.

Aos demais familiares, amigos, colegas e professores, que me acompanharam nos momentos de trabalho duro e de folga que a graduação me proporcionou.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do *software* de código aberto para cálculo das proteções de uma rede de distribuição radial de média tensão. O *software* proposto, denominado MyGrid.protect permite o estudo de coordenação e seletividade das proteções.

Idealizado para ser a união de uma interface gráfica que apresenta a topologia da rede e uma biblioteca que modela o comportamento dos dispositivos em situações de falta, o MyGrid.protect teve seu desenvolvimento impulsionado pela deficiência dessas características no MyGrid (JUREMA, 2019), API para representação topológica de redes radiais em Representação Nó-Profundidade (RNP) com funções de cálculo de fluxo de potência e curto-circuito por componentes de fase, implementado pelo Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Ambos os *softwares* são livres e desenvolvidos em Python pelo paradigma da Programação Orientada à Objetos (POO). Isso os torna atraentes ao uso para fins acadêmicos tanto por serem gratuitos para uso e implementação, quanto por garantirem flexibilidade e expansibilidade de suas bibliotecas, agregando funções e dispositivos junto com o avanço das novas tecnologias em proteção.

O MyGrid.protect permite a análise tanto de redes já existentes como daquelas em fase de projeto, permitindo a realização de estudos de viabilidade, expansão e operação do sistema de potência, com grande economia de tempo, sendo necessário apenas que a rede em questão seja modelada parcial ou integralmente no MyGrid.

Ao final do trabalho é apresentado um estudo de caso no qual são apresentados os resultados dos cálculos das proteções de uma rede de distribuição pelas filosofias coordenada e seletiva do MyGrid.protect utilizando os dados de fluxo de potência e curto-circuito calculados pelo MyGrid.

Palavras-chave: Redes Elétricas de Distribuição. Proteção de Redes Elétricas. Proteção Coordenada. Proteção Seletiva.

ABSTRACT

This paper presents the development of an open source software for calculating the protection device adjustments of a medium voltage radial distribution network considering selectivity and coordination known as MyGrid.protect.

Designed to be the union of a graphical interface that presents the network topology and a library that models the behavior of devices in fault situations, MyGrid.protect was driven by the deficiency of these features in MyGrid (JUREMA, 2019), API for topological representation of radial networks in Node-Depth Encoding (NDP) with power flow and short circuit calculation functions by phase components, implemented by the Intelligent Electrical Networks Group (GREI) of the Department of Electrical Engineering (DEE) of the Federal University of Ceará (UFC).

Both software programs are free and developed in Python by the Object Oriented Programming (OOP) paradigm. This makes them attractive to use for academic purposes because they are free to use and implement, also because they guarantee the flexibility and expandability of their libraries, adding functions and devices along with the advancement of new protection technologies.

MyGrid.protect allows the analysis of both existing networks and those in the design phase, allowing feasibility studies, expansion and operation of the power system with great time savings, requiring only that the network in question be modeled partially or fully by MyGrid.

At the end of the work a case study is presented where the protection of a distribution network is calculated by the coordinated and selective philosophies of MyGrid.protect using the power flow and short circuit data calculated by MyGrid.

Keywords: Electric Distribution Network. Power Grid Protection. Coordinated protection. Selective Protection

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características gráficas dos diversos tipos de curvas tempo <i>versus</i> corrente de relés.	23
Figura 2 – IED Vamp 300 da <i>Schneider</i>	25
Figura 3 – Conjugação das curvas de Tempo Definido, Tempo Inverso e Instantânea de um IED.	27
Figura 4 – Uma chave-fusível do tipo expulsão.	28
Figura 5 – Curvas características de fusão tempo <i>versus</i> corrente para elos fusíveis tipo H.	31
Figura 6 – Curvas características de fusão tempo <i>versus</i> corrente para elos fusíveis tipo K do Grupo A.	32
Figura 7 – Curvas características de fusão tempo <i>versus</i> corrente para elos fusíveis tipo K do Grupo B.	33
Figura 8 – Curvas características de fusão tempo <i>versus</i> corrente para elos fusíveis tipo T do Grupo A.	34
Figura 9 – Curvas características de fusão tempo <i>versus</i> corrente para elos fusíveis tipo T do Grupo B.	35
Figura 10 – Zonas de Proteção.	36
Figura 11 – Dispositivos protetor e protegido de uma zona de proteção simples.	37
Figura 12 – Rede fictícia para comparação entre seletividade e coordenação.	39
Figura 13 – Fluxo de dados entre MyGrid, MyGrid.protect e Usuário.	44
Figura 14 – Diagrama UML do módulo protectCalc.	45
Figura 15 – Critério gráfico para verificação da seletividade entre elos-fusíveis.	52
Figura 16 – Diagrama UML do módulo protectGraphics	54
Figura 17 – Aparência da janela MainWindow.	55
Figura 18 – Critério gráfico e lógico para seletividade entre elos-fusíveis de um circuito fictício.	55
Figura 19 – Aparência de um objeto gráfico da classe SwitchLine do tipo IED.	56
Figura 20 – Aparência de um objeto gráfico da classe SwitchLine do tipo chave-fusível.	57
Figura 21 – Aparência de dois objetos gráficos da classe SwitchLevel.	58
Figura 22 – Aparência da janela da classe IEDWindow ao criar novo IED.	59
Figura 23 – Aparência da janela da classe IEDWindow ao editar ajustes de IED.	60
Figura 24 – Aparência da janela da classe newSwitchWindow.	61

Figura 25 – Topologia da Rede de Distribuição Canandense.	62
Figura 26 – Topologia da Rede de Distribuição Canandense Adaptada com GD.	63
Figura 27 – Topologia da Rede de Distribuição Canandense Adaptada sem GD.	63
Figura 28 – Curvas dos tempos de fusão máximo e mínimo <i>versus</i> corrente dos elos R7 e R8.	65
Figura 29 – Ajustes do IED R6.	66
Figura 30 – Curvas de tempo máximo e mínimo <i>versus</i> corrente do IED e do elo R7. . .	66
Figura 31 – Ajustes do IED R5.	67
Figura 32 – Curvas de tempo de atuação dos IEDs R5 e R6.	67
Figura 33 – Ajustes do IED R1.	68
Figura 34 – Ajustes do IED R2.	68
Figura 35 – Ajustes do IED R3.	69
Figura 36 – Ajustes do IED R4.	69
Figura 37 – Curvas de tempo de atuação de fase dos IEDs R1, R2, R3, R4, R5 e R6. . .	69
Figura 38 – Curvas de tempo de atuação de neutro dos IEDs R1, R2, R3, R4, R5 e R6. .	70
Figura 39 – Ajustes do IED R6.	70
Figura 40 – Curvas de tempo máximo e mínimo <i>versus</i> corrente do IED e do elo R7 pela filosofia coordenada.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes normatizadas para curvas de RSTI	24
Tabela 2 – Funções de sobrecorrente da tabela ANSI de Proteção	27
Tabela 3 – Valores nominais padronizados de Elos-Fusíveis	29
Tabela 4 – Dados da Rede Canadense de Distribuição (RCD)	62
Tabela 5 – Correntes Nominais Calculadas no MyGrid.	64
Tabela 6 – Curto-Circuitos calculados no MyGrid.	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Relevância do Tema	16
1.2	Estado da arte	16
1.3	Justificativa	18
1.4	Objetivos	19
<i>1.4.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	19
<i>1.4.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	19
1.5	Estrutura	20
2	PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	21
2.1	Dispositivos de Proteção	22
2.2	Relés de Sobrecorrente	23
<i>2.2.1</i>	<i>Relés Microprocessados (IEDs)</i>	25
<i>2.2.2</i>	<i>Padronização das Funções de Proteção</i>	26
2.3	Chaves-Fusíveis	28
2.4	Elos-Fusíveis	29
<i>2.4.1</i>	<i>Tipos de Elos-Fusíveis</i>	29
<i>2.4.2</i>	<i>Critérios para especificação de Elos-Fusíveis</i>	30
2.5	Zona de Proteção	36
2.6	Características de um Sistema de Proteção	37
2.7	Filosofia do Sistema de Proteção	38
<i>2.7.1</i>	<i>Proteção Seletiva</i>	38
<i>2.7.2</i>	<i>Proteção Coordenada</i>	39
<i>2.7.3</i>	<i>Critérios para a seleção da filosofia de Proteção</i>	39
<i>2.7.3.1</i>	<i>Critério da Densidade populacional</i>	39
<i>2.7.3.2</i>	<i>Critério dos índices de continuidade</i>	40
3	METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE	42
3.1	Estrutura do MyGrid.protect	43
3.2	Classes da biblioteca protectCalc	45
<i>3.2.1</i>	<i>Classe IED</i>	46
<i>3.2.1.1</i>	<i>Método __init__</i>	46

3.2.1.2	<i>Método calculateCurveP</i>	46
3.2.1.3	<i>Método calculateCurveN</i>	46
3.2.1.4	<i>Método autoSettingCoord</i>	46
3.2.1.5	<i>Método autoSettingSelect</i>	49
3.2.2	<i>Classe FuseSwitch</i>	49
3.2.3	<i>Classe FuseLink</i>	50
3.2.3.1	<i>Método __init__</i>	50
3.2.3.2	<i>Método loadCurve</i>	50
3.2.3.3	<i>Método autoSetting</i>	50
3.2.4	<i>Classe PowerGrid</i>	51
3.2.4.1	<i>Método __init__</i>	51
3.2.4.2	<i>Método autoSettingCoord</i>	51
3.2.4.3	<i>Método autoSettingSelect</i>	51
3.2.4.4	<i>Método autoSwSwSelect</i>	51
3.2.4.5	<i>Método autoIEDSwCoord</i>	52
3.2.4.6	<i>Método autoIEDSwSelect</i>	53
3.2.4.7	<i>Método autoIEDIEDSelect</i>	53
3.3	<i>Classes da biblioteca protectGraphics</i>	54
3.3.1	<i>Classe Main Window</i>	54
3.3.1.1	<i>Método __init__</i>	54
3.3.1.2	<i>Método plotCoordinationGraphPhase</i>	54
3.3.1.3	<i>Método plotCoordinationGraphNeutral</i>	55
3.3.2	<i>Classe SwitchLine</i>	56
3.3.2.1	<i>Método __init__</i>	56
3.3.2.2	<i>Método setSwitchType</i>	56
3.3.2.3	<i>Método configFuseSwitch</i>	57
3.3.2.4	<i>Método configIED</i>	57
3.3.3	<i>Classe SwitchLevel</i>	57
3.3.3.1	<i>Método __init__</i>	57
3.3.3.2	<i>Método createSwitch</i>	58
3.3.4	<i>Classe IEDWindow</i>	58
3.3.4.1	<i>Método __init__</i>	59

3.3.4.2	<i>Método organizeCreate</i>	59
3.3.4.3	<i>Método organizeEdit</i>	59
3.3.4.4	<i>Método confirm</i>	59
3.3.4.5	<i>Método edit</i>	60
3.3.4.6	<i>Método cancel</i>	60
3.3.5	<i>Classe newSwitchWindow</i>	60
4	ESTUDO DE CASO	62
4.1	Seletividade R7 (protegido) – R8 (protetor)	65
4.2	Seletividade R6 (protegido) – R7 (protetor)	66
4.3	Seletividade R5 (protegido) – R6 (protetor)	67
4.4	Seletividade nos pares de dispositivos R1 a R6	68
4.5	Coordenação R6 (protegido) – R7 (protetor)	70
4.6	Considerações gerais	71
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
5.1	Trabalhos Futuros	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do Tema

Nas últimas duas décadas a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vem exigindo das concessionárias de energia uma maior confiabilidade no fornecimento. Suas principais ferramentas de monitoramento são os indicadores de continuidade: DEC, FEC, DIC, DMIC e FIC (ANEEL, 2015). Além desses indicadores, também foi desenvolvido com o mesmo objetivo um conjunto de normas para padronizar as atividades técnicas na distribuição de energia chamado Procedimentos de Distribuição (Prodist). Além da confiabilidade, o Prodist busca a melhora de uma série de outros requisitos da rede, como qualidade, eficiência e segurança (PEREIRA, 2007).

Neste cenário, a proteção de sistemas elétricos de potência é uma área que está diretamente ligada à qualidade do fornecimento de energia elétrica. Seja na preservação de equipamentos, evitando que sejam danificados por condições anormais de operação, aumentando sua vida útil, ou no rápido restabelecimento automático do sistema em falhas transitórias, a proteção tem sido fator crucial na redução do tempo e da frequência em que as redes permanecem fora de operação (COTOSCK, 2007; ANDERSON, 1998).

Essas exigências normativas trouxeram a necessidade de se agilizar o exaustivo trabalho de posicionar, ajustar e coordenar os dispositivos de proteção. A solução encontrada pelo mercado foi o desenvolvimento de *softwares* que, entre outras funções, realizam a modelagem das redes e a simulação de situações de falta, permitindo a análise da atuação dos relés nessas condições. Alguns ainda trazem bancos de dados com os modelos de equipamentos e condutores de diferentes fabricantes, fazendo o seu dimensionamento e facilitando a análise de coordenação e seletividade.

1.2 Estado da arte

A seguir é apresentado o resultado de uma pesquisa sobre as mais utilizadas ferramentas computacionais para estudos de proteção em sistemas de potência.

O *Cyme Power Engineering Software* é composto de um editor de redes, um módulo de análise focado em Distribuição e um segundo para aplicações Industriais ou em Transmissão. Tanto o *software* como um conjunto de bibliotecas customizáveis pelo usuário estão disponíveis

no site da Eaton, atual desenvolvedora e detentora dos direitos de uso da marca. Dentre essas bibliotecas, a *Protective Device Coordination* (CYMTCC) é a que possui maior relevância por executar funções semelhantes às do *software* MyGrid.protect. A geração de curvas tempo x corrente armazenadas em banco de dados editáveis e o método conhecido como "coordenação inteligente", que verifica a coordenação entre dispositivos e sugere um novo ajuste caso o resultado da verificação tenha sido negativo. Entre os dispositivos modelados, estão os relés eletrônicos, numéricos e digitais. Pode ser adquirido no site da empresa via *download* mediante pagamento de licença (CYME INTERNATIONAL, 2018; PEREIRA, 2007)

O grupo *Advanced Systems for Power Engineering, Inc* (ASPEN) é o desenvolvedor e também distribuidor de um conjunto de ferramentas para aplicação na engenharia de sistemas de potência desde 1986. Pioneira no mercado, inclui *softwares* que realizam desde a representação topográfica e multifilar das redes (ASPEN *DistriView*) a estudos de fluxo de potência (ASPEN *Power Flow*). Apesar de não possuir módulos de cálculo de curto-circuito, os dados podem ser convertidos para formatos compatíveis com *softwares* que o fazem, como o CYME, por exemplo. Além dos dois *softwares* citados anteriormente, também é utilizado em estudos de proteção o ASPEN *OneLiner*. Com os três é possível alterar modelos e fazer estudos, implantar ajustes nos relés e analisar a coordenação das proteções. Outras funções de destaque são a verificação de coordenação entre relés, a presença de interface gráfica e a análise de pós-falta. É capaz de modelar redes e cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas e sua base de dados inclui relés de sobrecorrente, elos-fusíveis, religadores e seccionalizadores. Também adquirido no site da empresa desenvolvedora, via pagamento de licença(ASPEN INC., 2019; PEREIRA, 2007).

O *Synergi Electric*, inicialmente desenvolvida pela Advantica com o nome de *SynerGEE*, é uma marca da DNV GL que se aplica a diferentes módulos computacionais com as mais variadas aplicações a sistemas elétricos. Em especial o *Synergi Electric - Protection* será descrito, pois fornece uma interface gráfica para desenho, modelagem e cálculo das proteções de sobrecorrente em redes de distribuição radial. Esse *software* é capaz de verificar a coordenação entre os dispositivos através de ferramenta própria chamada "*Check Coordination Analysis*". A verificação é feita por pares de dispositivos, conferindo se as margens de atuação estão dentro do limite definido pelo usuário. Além disso, destaca-se a função de plotagem de curvas dos mais de mil dispositivos de proteção cadastrados, que podem ser elos-fusíveis, religadores, disjuntores e seccionalizadores. Assim como os anteriores, este software também está disponibilizado no site do desenvolvedor para *download* via pagamento de licença (DNV GL, 2019; PEREIRA, 2007)

O *software EasyPower*® da ESA, Inc destaca-se pela sua simplicidade de uso. Pode ser adquirido via pagamento de licença ou por solicitação de versão de testes de 30 dias. Dentre os módulos que o compõem, o *PowerProtector*TM inclui funções para estudos de coordenação e seletividade, além de plotar as curvas dos dispositivos por ele modelados. Sua interface otimizada utiliza a simbologia ANSI ou IEEE para representar os componentes. Todos os símbolos são interativos e podem ter os ajustes do IED associado facilmente atualizados (ESA, 2019; PEREIRA, 2007)

Mediante revisão bibliográfica sobre o estado da arte, percebe-se que apesar de possuírem muitas funções, esses *softwares* têm os seus códigos-fonte protegidos e são em sua grande maioria obtidos apenas via licenças pagas ou *demos* com prazo limitado para testes. Os custos das versões pagas e os limitados recursos das versões de teste inviabilizam o seu uso como ferramenta acadêmica de estudos. Por este motivo, tem-se dado preferência ao estudo e desenvolvimento de *softwares* de código aberto em artigos científicos recentes (THURNER *et al.*, 2017). Em comparação com os *softwares* comerciais, a principal deficiência destes *softwares* ditos acadêmicos está no fato da grande maioria, com raras exceções, realizar os cálculos de curto-circuito com componentes simétricas. Apesar de ser uma aproximação simples e por vezes eficiente do comportamento da rede, esses cálculos analisam uma condição que é praticamente inexistente durante a operação: o balanceamento exato das fases.

Diante do exposto, é notória a necessidade de um único *software* em código aberto que englobe e execute de maneira otimizada as seguintes funcionalidades:

1. Modelagem computacional da rede;
2. Cálculo de fluxo de carga;
3. Cálculo de curto-circuito assimétrico;
4. Estudo de coordenação e seletividade das proteções.

1.3 Justificativa

Desenvolvido pelo Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC), o MyGrid é uma ferramenta de código aberto que realiza a modelagem topológica da rede baseada em Representação Nó Profundidade (RNP) e Programação Orientada a Objetos (POO).

O MyGrid realiza a análise de fluxo de carga e curto-circuito de redes elétricas de distribuição radial através do método de varredura direta inversa e a modelagem de rede por

componentes de fase. Além disso apresenta como diferencial o uso de métodos que permite o estudo de redes elétricas com Geração Distribuída (JUREMA, 2019).

O MyGrid engloba as funcionalidades desejadas de cálculo e modelagem descritas na Seção 1.1, não realizando o estudo de proteção. A proposta desse trabalho é suprir essa deficiência através da implementação de um módulo de proteção e de uma interface gráfica que facilite a visualização do sistema de potência pelo usuário.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo Geral*

Apresentar a modelagem e implementação de um *software* computacional gráfico de proteção de redes de distribuição em média tensão integrável ao MyGrid com funcionalidades que permitam a análise de coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

Este trabalho contempla os seguintes objetivos específicos.

- Fazer uso de linguagem orientada a objetos (*Python*) para criar uma interface gráfica interativa que apresente a topologia da rede de distribuição;
- Fazer uso de objetos *Python* para modelar os dispositivos de proteção, como relés e chaves-fusíveis, de uma rede de distribuição;
- Realizar a integração com o MyGrid, permitindo a importação das correntes lá calculadas;
- Implementar um método para que o programa selecione os parâmetros de IEDs e os elos-fusíveis para chaves seguindo as filosofias de proteção coordenada ou seletiva;
- Gerar coordenogramas para os IEDs modelados;
- Reunir uma base de dados editável com curvas de elos-fusíveis de diferentes fabricantes;
- Gerar os gráficos de tempo inverso para os elos-fusíveis modelados;
- Realizar a análise de coordenação e seletividade através dos gráficos obtidos.

1.5 Estrutura

Este trabalho se divide em 5 capítulos:

No primeiro capítulo é feita uma breve introdução sobre o assunto, apresentando o contexto, justificativa, objetivos e estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos temas abordados, com foco nas proteções de sobrecorrente e dispositivos de proteção. Também é falado sobre a normatização das curvas de relés pela IEC e ANSI/IEEE.

No terceiro capítulo é apresentado a metodologia de implementação do módulo de proteção: a modelagem de dispositivos pelo paradigma da Orientação a Objeto da linguagem *Python*, os métodos para a integração das classes do MyGrid às suas classes e a implementação dos métodos computacionais para ajustes das proteções coordenada e seletiva da rede.

No quarto capítulo é feito um estudo de fluxo de carga e curto circuito de uma rede de distribuição no MyGrid, em seguida são coletados os dados necessários para executar o módulo de proteção e gerar as curvas de coordenação.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões e propostas de futuros desenvolvimentos.

2 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Neste capítulo serão definidos alguns conceitos sobre a operação e proteção de redes de distribuição. Em uma rápida revisão bibliográfica, serão apresentadas as principais características dos dispositivos contemplados no *software*, relés microprocessados e chaves-fusíveis. Em seguida serão apresentada as zonas de proteção e como defini-las seguindo as filosofias de proteção coordenada e seletiva.

Antes de definir os conceitos referentes à proteção, é preciso entender as três situações de operação de um sistema elétrico (COTOSCK, 2007; ANDERSON, 1998).

- A situação normal de funcionamento pode ser entendida como aquela em que não há falha, quando a rede opera como esperado;
- A situação anormal de funcionamento é quando uma falha surge na rede mas não eleva a corrente da mesma a níveis que caracterizem curto-circuito. É a situação intermediária, em que a rede não opera em condições normais mas ainda não é capaz de provocar danos nos equipamentos e;
- A situação de curto-circuito é a mais perigosa, pois as altas correntes podem danificar severamente os equipamentos, a infra-estrutura e a própria rede.

Um sistema elétrico, independente da sua complexidade, está sujeito a problemas que podem levar a uma situação anormal ou de curto-circuito. Quanto à origem desses problemas, pode-se dividir em três grandes grupos: isolamento, eventos mecânicos e eventos elétricos (RODRIGUES, 2015). Destes, os eventos mecânicos são responsáveis por 70% a 90% de todas as faltas em sistemas elétricos (CEMIG, 2017), e são associados a agentes naturais como o vento, o acúmulo de neve na linha, o contato acidental de árvores e a corrosão por maresia. No entanto podem ter origem não-natural como albarroamentos e vandalismos, por exemplo.

Sabendo que essas falhas existem e que algumas delas são inevitáveis, a proteção dos sistemas elétricos atua no sentido de atingir dois objetivos (MAMEDE; MAMEDE, 2011).

- garantir a continuidade de serviço e;
- proporcionar segurança às pessoas e ao sistema elétrico.

Em outras palavras, a proteção tem o objetivo de evitar danos à infra-estrutura, elementos e dispositivos da rede na ocorrência de uma falha, como curto-circuito e evitar danos às pessoas, fornecendo energia com mais qualidade através da rápida eliminação da falha e do rápido restabelecimento da rede.

Também são considerados outros aspectos que norteiam a elaboração, projeto e

implementação da proteção elétrica. Um deles é o aspecto econômico, que por vezes limita, entre outros elementos, o tipo de equipamento utilizado na rede. No caso de relés, por exemplo, embora já existam os microprocessados com várias vantagens funcionais e construtivas em relação aos eletromecânicos, pode-se ter ambos instalados em um mesmo trecho de rede por ser mais viável economicamente manter o relé eletromecânico que substituí-lo.

Para atingir os dois objetivos, o projetista ou operador de rede aplica dispositivos de proteção, os relés e chaves-fusíveis, ao longo da linha de modo a cumprir os requisitos estabelecidos. No decorrer desse capítulo serão apresentados mais conceitos de proteção e melhor definidos os dispositivos de proteção e as suas características funcionais.

2.1 Dispositivos de Proteção

Os principais dispositivos de proteção instalados nas redes são os relés e as chaves-fusíveis.

O conjunto composto por uma chave e um elo fusível associados forma um elemento de proteção monofásico muito utilizado em redes de distribuição em média tensão. A atuação acontece interrompendo o circuito (fase na qual está instalado) na presença de sobrecorrentes (CEMIG, 2017).

Como o dispositivo desconecta apenas a fase defeituosa, sua aplicação deve estar em conformidade com o tipo de consumidor a ser atendido pela rede. Enquanto sua atuação traz desvantagens para sistemas trifásicos, que passam a ser atendidos por apenas duas fases, perdendo potência, os demais consumidores monofásicos da rede não sofrem interrupção.

Os relés são dispositivos que monitoram uma grandeza, em geral a corrente, a tensão ou a frequência, atuando quando um limite definido previamente é ultrapassado. O foco deste trabalho será dado nos relés de sobrecorrente.

Diferentemente das chaves-fusíveis que são tanto o dispositivo sensibilizado como o que abre o circuito, o relé não possui essa última funcionalidade. Ele supervisiona a corrente do sistema e, ao atuar, comanda a abertura de um segundo dispositivo que pode ser um religador ou um disjuntor que então interrompe o fornecimento de energia.

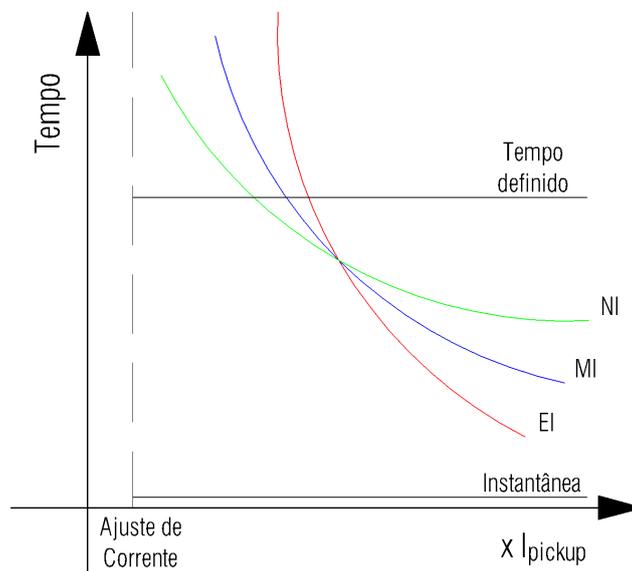
Dependendo da tecnologia construtiva do relé, ele pode ser mono ou polifásico e executar uma única ou diferentes funções de proteção (PEREIRA, 2007; SCHNEIDER ELECTRIC, 2018). Essas particularidades serão abordadas nas seções seguintes.

2.2 Relés de Sobrecorrente

Os relés de sobrecorrente são o tipo específico para atuação em correntes que fujam daquelas caracterizadas como de operação normal de funcionamento (COTOSCK, 2007; ANDERSON, 1998).

Quanto às curvas tempo de resposta desses dispositivos às sobrecorrentes, ilustradas na Figura 1, podem ser classificados em (RODRIGUES, 2015; PEREIRA, 2007; ELETROBRÁS, 1982):

Figura 1 – Características gráficas dos diversos tipos de curvas tempo *versus* corrente de relés.



Fonte: O Autor.

- Relé de Sobrecorrente Instantâneo (RSI): tem função de eliminar a falta tão logo a identifica. Assim, não possui atrasos propositalmente entre a detecção e a atuação, fazendo com que seja o mais rápido dos três tipos. Seu único ajuste é a corrente mínima para sensibilizar o dispositivo.
- Relé de Sobrecorrente de Tempo Definido (RSTD): possui um atraso específico para qualquer que seja o valor de sobrecorrente que o percorre. Possui dois ajustes básicos, a corrente mínima para a qual deve atuar e o tempo que levará da identificação dessa corrente até a abertura do circuito.
- Relé de Sobrecorrente de Tempo Inverso (RSTI): de maneira semelhante às chaves-fusíveis, o tempo de atuação é inversamente proporcional a magnitude da corrente. São os mais versáteis, permitindo que se ajuste a corrente mínima e o

ção inversa é a relação tempo versus corrente. A curva formada por essa relação é chamada de curva de tempo inverso e pode se classificar em Normalmente Inversa (NI), Muito Inversa (MI) ou Extremamente Inversa (EI) de acordo com a inclinação que possuir.

Por padronização da norma NBR 7099 (ABNT, 1981) que é baseada na IEC 255-4, as curvas dos RSTI têm seu tempo de atuação definido pela Equação 2.1.

$$T = Dial \times \left[\frac{\beta}{\frac{I}{I_{pick\ up}} \alpha - 1} \right] \quad (2.1)$$

onde:

- T tempo de operação, em segundos;
- $Dial$ dial de tempo;
- I corrente lida pelo relé, em Ampére;
- $I_{pick\ up}$ corrente de partida (*pick up*) ajustada no relé, em Ampére;
- α , β constantes normalizadas, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Constantes normalizadas para curvas de RSTI

Tipo de Curva	α	β
Normalmente Inversa	0,02	0,14
Muito Inversa	1,00	13,50
Extremamente Inversa	2,00	80,00

Fonte: (ABNT, 1981)

Do início da sua aplicação em redes elétricas até a atualidade, os relés evoluíram passando por mudanças que afetaram principalmente a sua capacidade operativa, permitindo que um mesmo dispositivo reunisse mais funções de proteção que os dispositivos implementados anteriormente. Isso foi possível graças aos avanços tecnológicos nas áreas de eletrônica, telecomunicações e informática, que trouxeram maior robustez, confiabilidade, precisão e até mesmo a redução de tamanho desses dispositivos. Pela ordem de surgimento, São classificados em eletromecânicos, estáticos analógicos, estáticos digitais e microprocessados.

Por razões econômicas e das especificidades de aplicação, dispositivos de diferentes tecnologias são encontrados instalados e operando em redes modernas (PEREIRA, 2007;

CEMIG, 2017; ELETROBRÁS, 1982). O foco desse trabalho será dado aos IEDs ou relés microprocessados, por uma série de vantagens apresentadas na Subseção 2.2.1.

2.2.1 Relés Microprocessados (IEDs)

Enquanto os relés eletromecânicos, os mais antigos já produzidos, operavam por indução ou atração eletromagnética, os primeiros relés estáticos eram baseados em transistores e diodos, e os subsequentes se utilizavam de circuitos integrados, a terceira geração estática é constituída de microprocessadores e por isso recebem o nome de relés microprocessados. Outro termo comum para esses dispositivos é IED que é a sigla em inglês para *Intelligent Electronic Device*. A Figura 2 apresenta um IED comercial.

Figura 2 – IED Vamp 300 da *Schneider*



Fonte: Schneider Electric (2018).

Além da evidente redução de tamanho graças à versatilidade dos microprocessadores, a capacidade de processamento aumentou exponencialmente, permitindo:

- o tratamento dos dados armazenados antes de retornarem ao usuário, facilitando a sua leitura e interpretação;
- que diferentes programas possam ser executados ao mesmo tempo (SCHNEIDER ELECTRIC, 2018);

- o envio dos dados armazenados a um servidor central por meio de protocolos internacionais de comunicação, evitando a perda de dados por limitações da capacidade interna de armazenamento.
- a localização mais precisa das faltas, através de alarmes ou envio de mensagens à longa distância;
- auto-testes, que podem sinalizar mau-funcionamento;
- a criação de curvas pelo próprio usuário, facilitando a coordenação e seletividade nas mais variadas aplicações e;
- que o equipamento se adapte a mudanças no sistema, podendo ter seus ajustes alterados a distância de modo a atender às necessidades da rede naquele momento (PEREIRA, 2007; GE GRID SOLUTIONS, 2019).

Do ponto de vista construtivo, esses dispositivos são formados por módulos (ou subsistemas) responsáveis por funções específicas. Embora cada fabricante tenha sua topologia própria, os IEDs são geralmente constituídos por módulos filtros, conversores analógicos-digitais (A/D), processador, memórias (RAM, ROM, PROM e EPROM), portas para comunicação e um módulo de alimentação.

2.2.2 Padronização das Funções de Proteção

Os ganhos de processamento e de acúmulo de funcionalidades dos relés microprocessados os tornaram extremamente versáteis, permitindo-se variar cada parâmetro com tanta precisão que um único relé pode ter um número praticamente infinito de curvas numa faixa de atuação limitada apenas pelos seus aspectos físicos. Essa versatilidade por vezes pode ser um problema quando se trabalha com equipamentos de diferentes fabricantes, tornando a tarefa de ajustar e coordenar os dispositivos muito trabalhosa e por vezes confusa.

Dessa necessidade veio a padronização das curvas e funções de proteção implantada pelas normas ANSI/IEEE e IEC. Outro elemento padronizado foi a comunicação entre relés e sistemas de controle centralizados através de protocolos, o que fez praticamente todos os IEDs comercializados atualmente serem facilmente ajustados, coordenados e até mesmo intercambiados independente do seu fabricante (MARTINS, 2012). A Tabela 2 traz as funções de sobrecorrente padronizadas pela tabela ANSI de proteção.

Um mesmo IED pode executar diferentes funções de proteção ao mesmo tempo, tendo uma curva que foge das definidas anteriormente em 2.2. Geralmente, mas não exclu-

Tabela 2 – Funções de sobrecorrente da tabela ANSI de Proteção

Número	Denominação
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
50N	Relé de sobrecorrente instantâneo de neutro
50G	Relé de sobrecorrente instantâneo de terra
51	Relé de sobrecorrente temporizado
51N	Relé de sobrecorrente temporizado de neutro
51G	Relé de sobrecorrente temporizado de terra
67	Relé direcional de sobrecorrente
67N	Relé de sobrecorrente direcional de neutro
67G	Relé de sobrecorrente direcional de terra

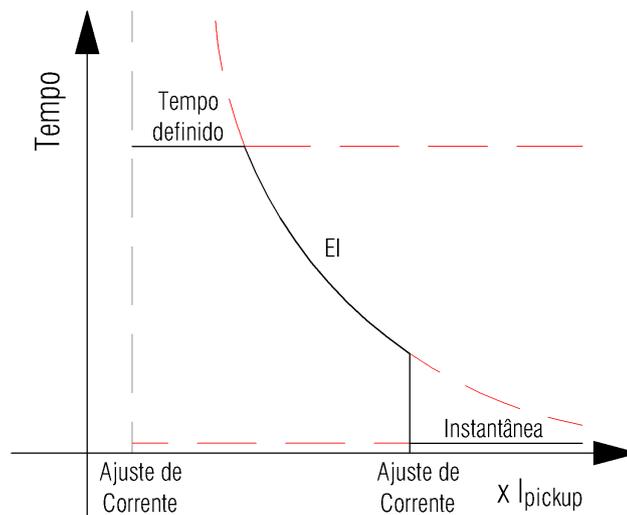
Fonte: ANSI

Nota: foram apresentadas apenas as funções de sobrecorrente.

Nota: as funções de neutro e terra (N e G) são chamadas complementares.

sivamente, a curva de um IED é a combinação de uma ou mais curvas de RI, RSTI e RSTD, conforme apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Conjugação das curvas de Tempo Definido, Tempo Inverso e Instantânea de um IED.



Fonte: O Autor.

Dependendo da natureza do elemento a ser protegido, como transformadores de distribuição e bancos capacitores, a curva pode ser livremente modificada de modo a suportar correntes de *in-rush*, por exemplo (RODRIGUES, 2015).

2.3 Chaves-Fusíveis

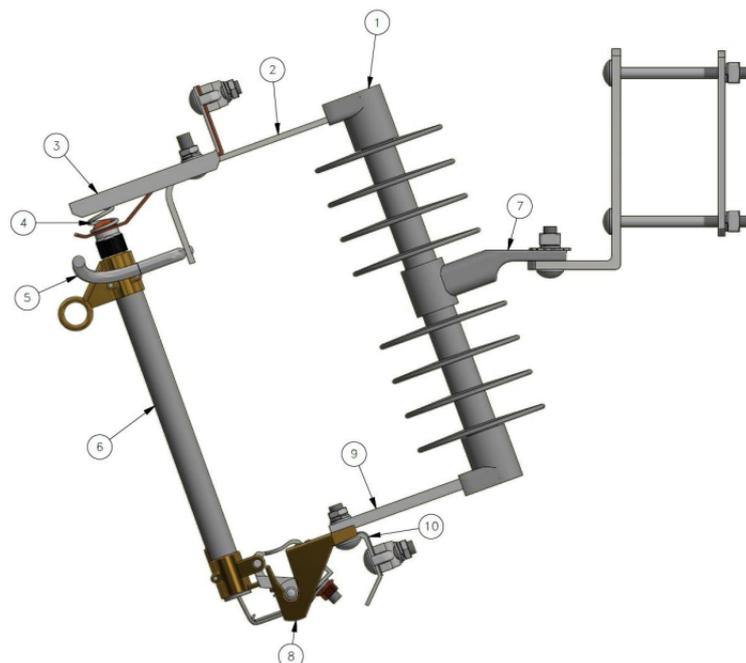
“A chave fusível é um dispositivo com estrutura projetada para a conexão de um cartucho contendo um elo fusível entre seus terminais” (CEMIG, 2017). Por essa definição, a chave em si é o elemento que dá estrutura ao elo-fusível, não sendo necessária a sua substituição mesmo com a fusão do mesmo.

Independente das características do elemento a proteger, se é uma linha, um capacitor, um transformador ou um cabo aéreo, as chaves podem ser utilizadas numa faixa de 4,16kV a 25kV. Em sistemas solidamente aterrados, como linhas monofásicas, transformadores monofásicos a neutro ou do tipo retorno pela terra e bancos de capacitores fechados em Y, a faixa se expande para 26,4kV a 34,5kV (S&C ELECTRIC COMPANY, 2019).

As chaves podem ser do tipo fechadas ou abertas, de acordo com a montagem das garras e cartuchos. Também podem ser classificadas quanto a capacidade de interrupção de corrente, nível de tensão onde são aplicadas e método de operação em expulsão.

Em seu trabalho, (PEREIRA, 2007) afirma que “No Brasil são comumente utilizadas as chaves-fusíveis de expulsão, monofásicas, com cartucho de fibra isolante, abertas, não repetitivas e indicadoras”. Corroborando essa afirmação, o Padrão de Materiais da Enel Distribuição (ENEL, 2018) define chaves fusíveis com essas características como as que podem ser aplicadas nos estados em que atua (Ceará, Rio de Janeiro, São Paulo e Goiás), conforme Figura 4.

Figura 4 – Uma chave-fusível do tipo expulsão.



Fonte: (ENEL, 2018).

Entre outros critérios físicos, químicos e de impacto ambiental (ENEL, 2018), os principais critérios técnicos para especificar uma chave-fusível para determinada aplicação são (CEMIG, 2017) a corrente, a tensão, as capacidades de interrupção simétrica e assimétrica, nível de isolamento e frequência.

2.4 Elos-Fusíveis

Enquanto a chave é a estrutura do conjunto, o elo fusível é a parte ativa e “[...] o dispositivo de proteção mais simples contra sobrecorrentes no sistema de distribuição” (CEMIG, 2017). Como um sensor de corrente, seu princípio de funcionamento consiste em fundir-se após ser percorrido por uma sobrecorrente por um período de tempo determinado. O tempo necessário para a fusão é inversamente proporcional à corrente que percorre o elo, assim, cada fabricante elabora uma curva de tempo inverso ($t \times I$) pela média dos resultados obtidos experimentalmente (PEREIRA, 2007; EDP-SP, 1987). Por essa curva também é possível mensurar a relação de rapidez do elo, que é a razão entre o tempo de resposta após sensibilização dividido pela corrente de curto que o sensibilizou (ABNT, 2011).

2.4.1 Tipos de Elos-Fusíveis

A NBR 7282 (ABNT, 2011) classifica os elos em 3 tipos de acordo com a sua curva de tempo inverso e são eles os tipos K, T e H. Além disso, os tipos K e T se dividem em grupos A e B, também conhecidos como preferencial e intermediário, respectivamente. Essa divisão se dá unicamente pela padronização de correntes nominais (ABNT, 2011), conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Valores nominais padronizados de Elos-Fusíveis

Elos tipo K & T preferenciais	Elos tipo K & T intermediários	Elos tipo H
6 A	8 A	0,5 A
10 A	12 A	1 A
15 A	20 A	2 A
25 A	30 A	3 A
40 A	50 A	5 A
65 A	80 A	
100 A		
140 A		
200 A		

Fonte: ABNT

A classificação também ajuda na seleção do elo mais adequado para cada aplicação, pois a diferença entre os tipos T e K são as suas relações de rapidez, enquanto que o tipo H suporta correntes de surto de curta duração (CEMIG, 2017), conforme descrição a seguir:

- Elos tipo K: suportam até 150% da sua corrente nominal sem fundire são aqueles com o menor tempo de resposta, variando entre 6 e 8,1, sendo chamados de elos fusíveis rápidos. São indicados para uso ao longo de alimentadores, por possuírem uma faixa maior de correntes, o que permite a coordenação desses dispositivos em série;
- Elos tipo T: de maneira semelhante aos tipo K, fundem acima de 150% da própria corrente nominal e são indicados para as mesmas aplicações. A diferença está na relação de rapidez, entre 10 e 13, por esta razão sendo chamados de elos fusíveis lentos;
- Elos tipo H: são os elos-fusíveis de alto surto, chamados assim pela sua característica de suportar altas correntes por um curto período de tempo. São indicados para proteger bancos capacitores, motores e transformadores, por não serem sensibilizados por correntes de partida, correntes de *in-rush*, transientes ou de surtos atmosféricos (CEMIG, 2017; ABNT, 2011).

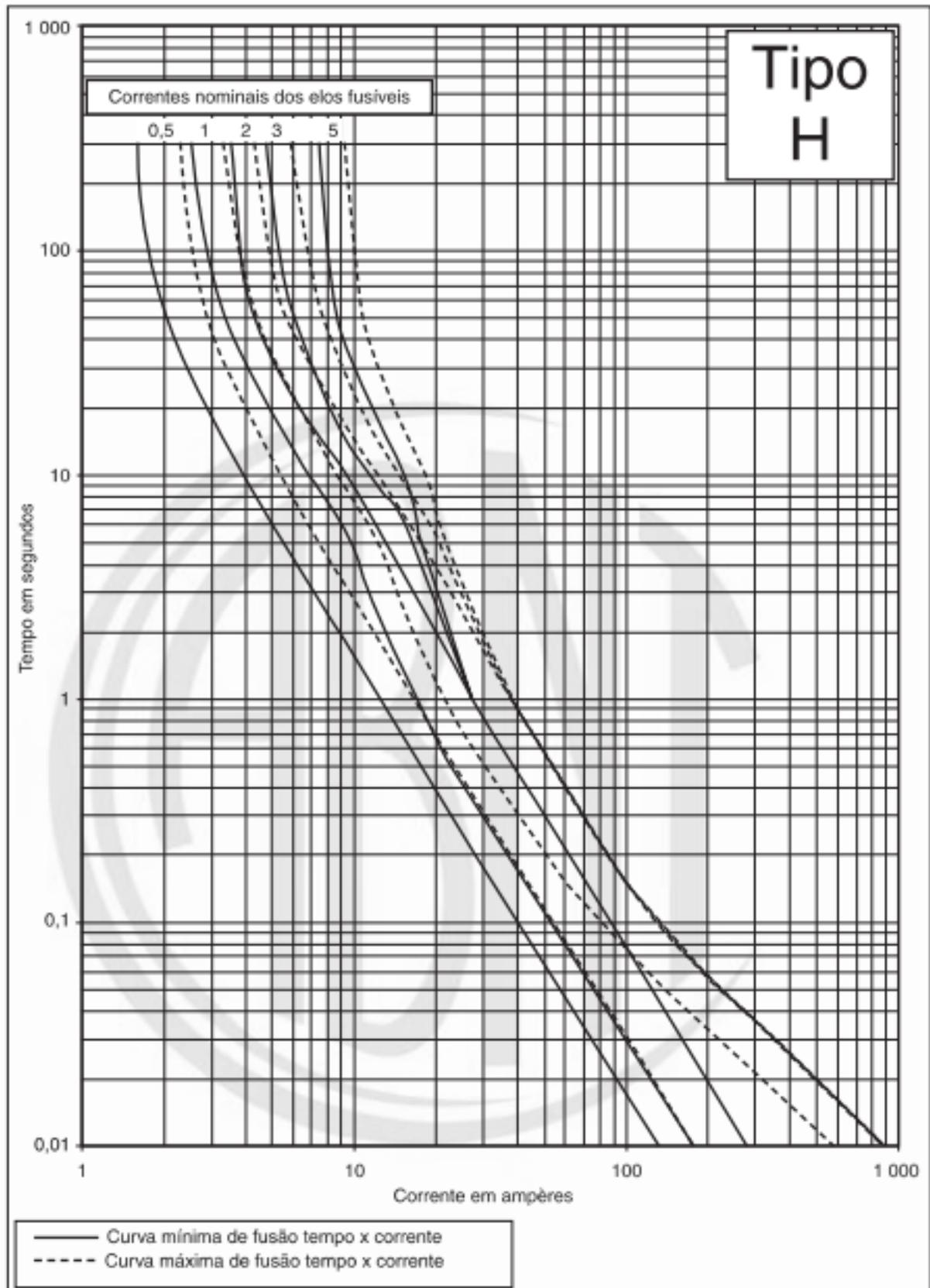
As Figuras 5, 6, 7, 8 e 9 descrevem as curvas de tempo inverso dos elos tipos K, T e H normatizadas pela ABNT (ABNT, 2011).

2.4.2 Critérios para especificação de Elos-Fusíveis

Entre outros critérios físicos, químicos e de impacto ambiental (ENEL, 2018), os principais critérios técnicos para especificar um elo-fusível para determinada aplicação (ABNT, 2011) são:

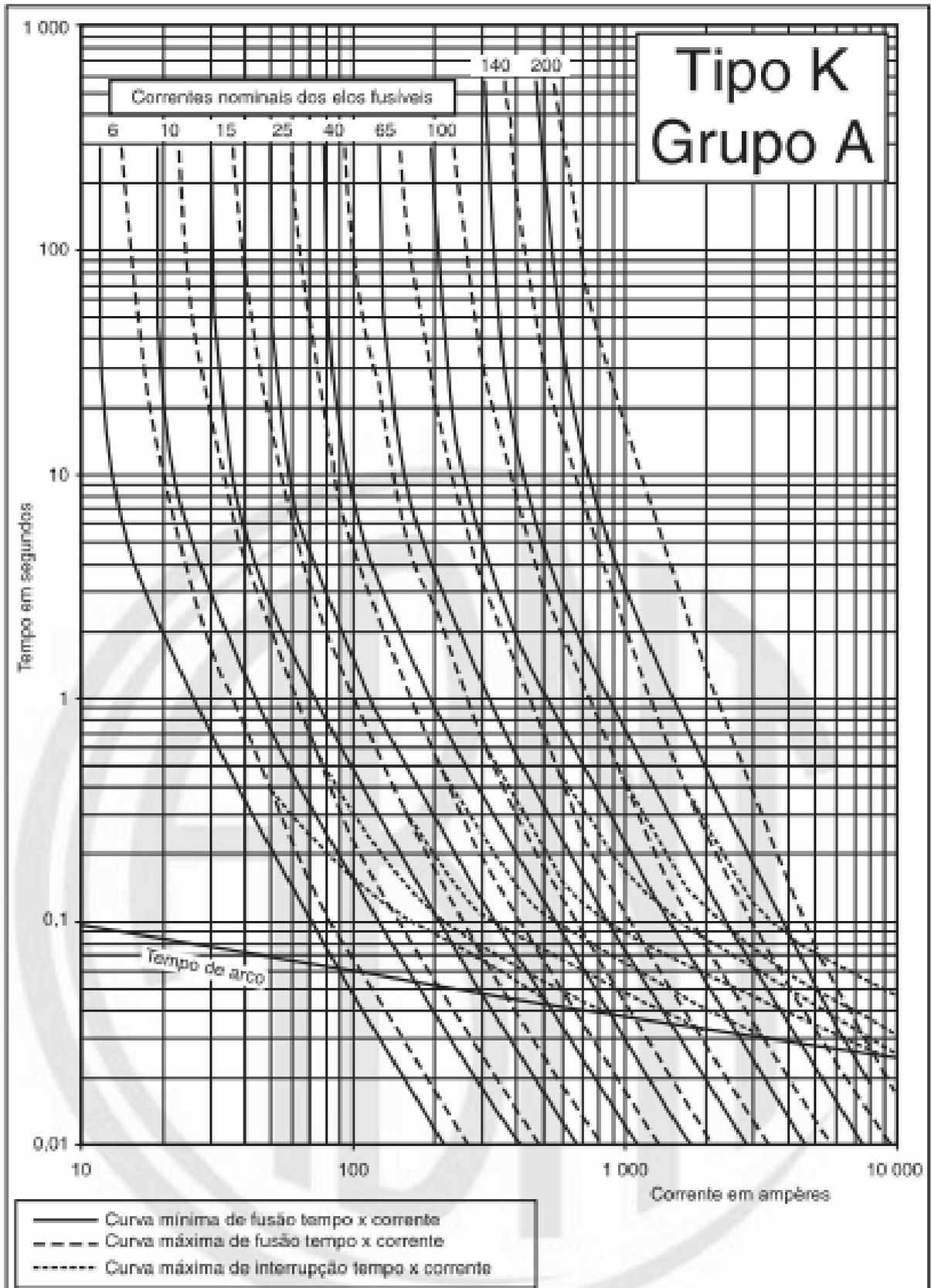
- Corrente nominal (I_n): especificado pela máxima corrente à qual o dispositivo é percorrido em condições normais, sendo esse seu valor mínimo. Recomenda-se que o I_n seja 150% dessa corrente quando há possibilidade de crescimento de carga;
- Tensão nominal (V_n): especificado como no mínimo a mesma classe de tensão do sistema (ABNT, 2011).

Figura 5 – Curvas características de fusão tempo *versus* corrente para elos fusíveis tipo H.



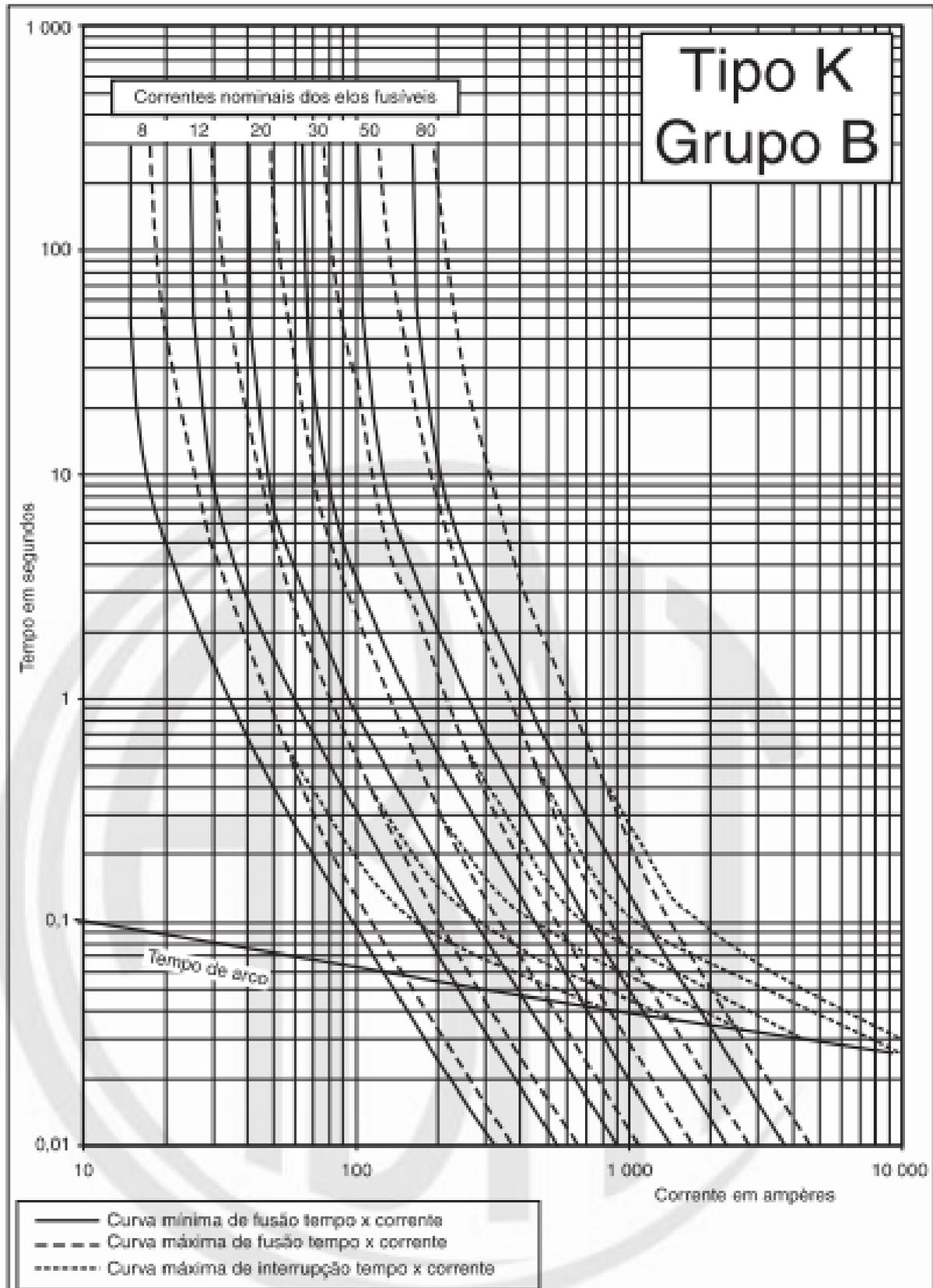
Fonte: (ABNT, 2011)

Figura 6 – Curvas características de fusão tempo *versus* corrente para elos fusíveis tipo K do Grupo A.



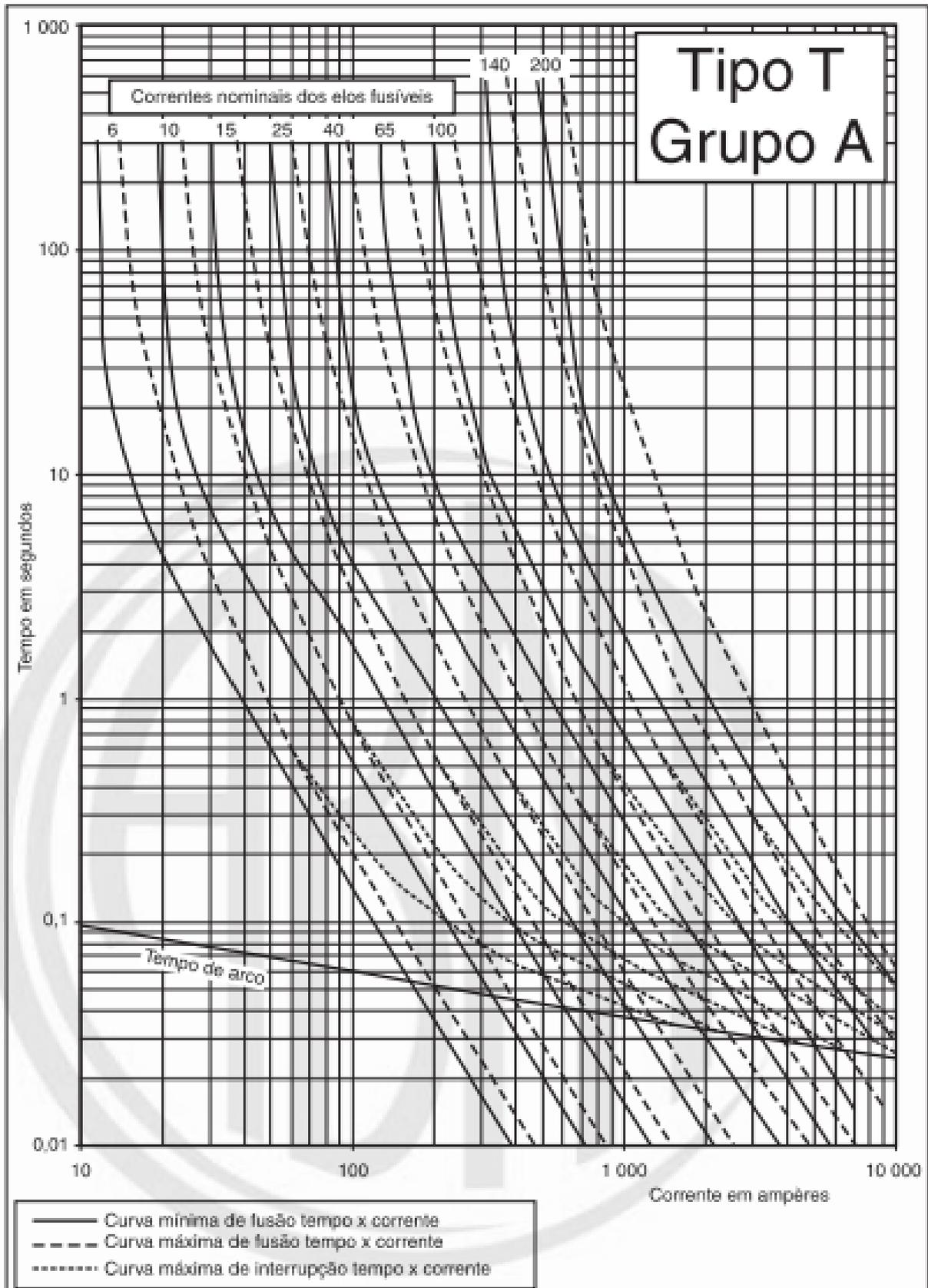
Fonte: (ABNT, 2011)

Figura 7 – Curvas características de fusão tempo *versus* corrente para elos fusíveis tipo K do Grupo B.



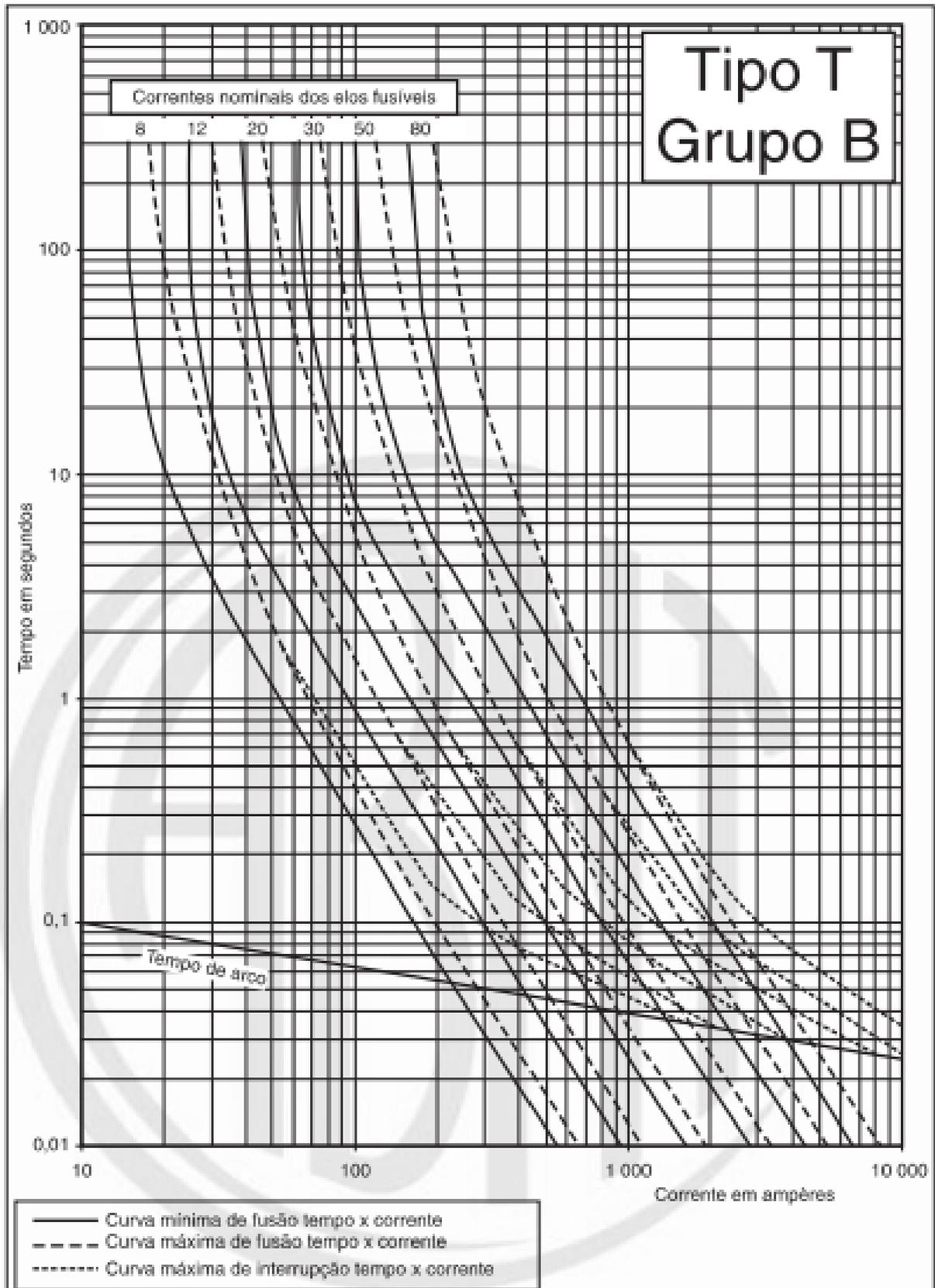
Fonte: (ABNT, 2011)

Figura 8 – Curvas características de fusão tempo *versus* corrente para elos fusíveis tipo T do Grupo A.



Fonte: (ABNT, 2011)

Figura 9 – Curvas características de fusão tempo *versus* corrente para elos fusíveis tipo T do Grupo B.

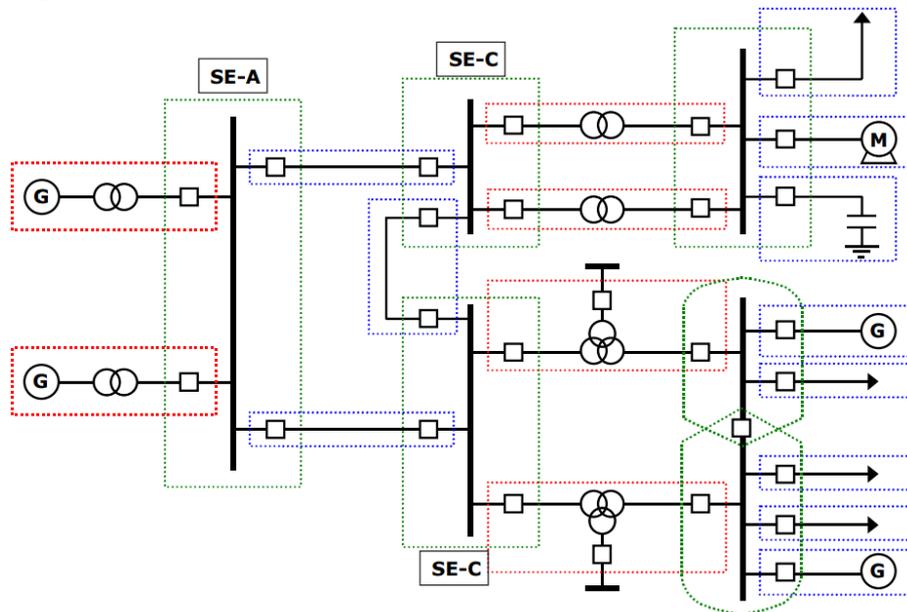


Fonte: (ABNT, 2011)

2.5 Zona de Proteção

Um vão do sistema elétrico delimitado por dois dispositivos de proteção, sejam eles relés ou chaves elo-fusível, formam o tipo mais característico e básico de zona de proteção (RODRIGUES, 2015). A depender da sua importância para o sistema, um vão pode possuir mais de uma fonte independente de alimentação e, conseqüentemente, mais de dois dispositivos de proteção, não descaracterizando todo o conjunto como uma zona de proteção. A Figura 10 traz exemplos de diferentes tipos de zona de proteção em um mesmo sistema (PEREIRA, 2007; ROSSI, 2005).

Figura 10 – Zonas de Proteção.



Fonte: (ROSSI, 2005).

Definir uma zona de proteção significa delimitar o trecho de rede que será desconnectado no caso de uma falta no vão em questão. Com isso em mente, entende-se que as zonas de proteção devem ser sobrepostas, evitando assim que existam trechos descobertos e, por isso, sem uma das proteções (principal ou de retaguarda), levando a propagação da falta ao longo do sistema.

A proteção primária ou principal de uma zona de proteção é realizada pelos dispositivos instalados mais à jusante e a eles dá-se o nome de dispositivos protetores. Por estar mais próximo à carga, deve ser o primeiro a se sensibilizar e atuar, eliminando as faltas temporárias ou permanentes no vão em que está instalado e impedindo a propagação da mesma pela rede. Já a proteção secundária ou de retaguarda é feita pelos dispositivos mais à montante, sendo estes

chamados de dispositivos protegidos. Sua função é atuar no caso de falha da proteção principal (PEREIRA, 2007; ROSSI, 2005). A Figura 11 apresenta uma zona de proteção simples e o posicionamento dos dispositivos protegido e protetor nela.

Figura 11 – Dispositivos protetor e protegido de uma zona de proteção simples.



Fonte: O Autor.

Quando localizada na mesma subestação que a principal, a proteção secundária é chamada de proteção de retaguarda local e, quando localizada em outra subestação, é chamada proteção de retaguarda remota (CEMIG, 2017).

2.6 Características de um Sistema de Proteção

A seguir são definidos alguns conceitos comuns à proteção de sistemas elétricos e que serão utilizados recorrentemente nesse trabalho (COTOSCK, 2007; RODRIGUES, 2015; ANDERSON, 1998).

- **Confiabilidade:** é a probabilidade da proteção atuar no caso de uma falta. Mesmo com a natureza esporádica das faltas, espera-se que a proteção instalada na rede esteja sempre apta a interrompê-las em qualquer situação, tanto na zona de proteção primária quanto na zona de retaguarda. A confiabilidade tende a diminuir com o tempo em operação, pois a exposição às intempéries e a magnitude das correntes que precisam ser interrompidas levam ao desgaste dos dispositivos.
- **Segurança:** diz-se que um sistema de proteção é seguro quando não é necessário que atue com frequência. Assim, o termo seguro é utilizado para indicar que o sistema opera quase que inteiramente em condições normais, com raros momentos em que a atuação da proteção é necessária.
- **Estabilidade:** é uma característica mais desejada quando se trata da proteção específica de equipamentos e é definida como a capacidade que o sistema tem de atuar apenas dentro da sua zona protegida.

- Sensibilidade: está relacionada com o menor valor acima do definido como condição normal de operação para o qual o dispositivo atua. Assim, quanto menor for o valor que o dispositivo for capaz de reconhecer, mais sensível ele é. Pode ser mensurada através de um coeficiente de sensibilidade "ks", que é a relação entre a corrente de curto-circuito mínimo da linha ($I_{cc_{min}}$) e a mínima capaz de sensibilizar o dispositivo, *pick up*, (I_{pk}) conforme Equação 2.2.

$$ks = \left[\frac{I_{cc_{min}}}{I_{pk}} \right] \quad (2.2)$$

- Seletividade: é capacidade do sistema de definir quais proteções atuarão de modo a desconectar o menor número de elementos do sistema ao eliminar a falta.
- Coordenação: Diz-se que o sistema está coordenado quando os dispositivos são ajustados de tal modo que a proteção de retaguarda é sensibilizada, mas só atua caso a proteção principal falhe.

O programa desenvolvido nesse trabalho, e que será discutido nos capítulos subsequentes, apresenta um método interativo de realizar os ajustes de IEDs e a seleção de Elos-fusíveis em uma rede. Além disso, ainda permite verificar a Coordenação e a Seletividade entre os mesmos através de gráficos.

2.7 Filosofia do Sistema de Proteção

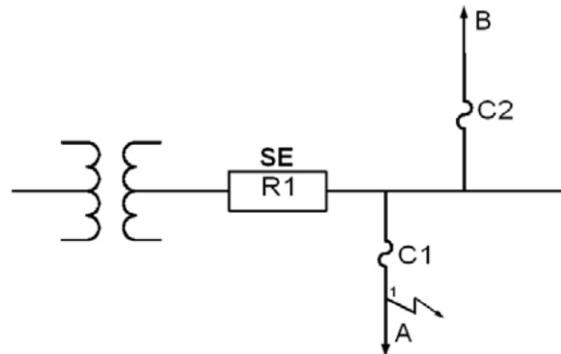
A seguir são definidas as duas filosofias que orientam o projetista na seleção e ajustes dos dispositivos utilizados no sistema de proteção (CEMIG, 2017).

2.7.1 Proteção Seletiva

Pela filosofia da "proteção seletiva", os dispositivos são selecionados, posicionados e ajustados dando-se preferência a reforçar a seletividade mesmo que em detrimento das demais características definidas em 2.6. Desse modo, no caso de uma falta, apenas o dispositivo mais próximo ao local interrompe a falta (CEMIG, 2017).

No caso de uma falta no ponto A da rede fictícia da Figura 12, C1 atua e elimina a falta permanecendo aberto. Assim, apenas os consumidores do trecho de rede a jusante de C1 são afetados e os demais consumidores desse alimentador não sofrem qualquer perturbação.

Figura 12 – Rede fictícia para comparação entre seletividade e coordenação.



Fonte: (CEMIG, 2017).

2.7.2 *Proteção Coordenada*

Pela proteção coordenada, os dispositivos são selecionados, posicionados e ajustados dando-se preferência a reforçar a característica de coordenação mesmo que em detrimento das demais definidas em 2.6. Nessa filosofia, as faltas de natureza transitória são eliminadas pela função instantânea do dispositivo de retaguarda e as de natureza permanente pela função temporizada do dispositivo protetor. Isso só é possível com a habilitação da função de religamento do dispositivo de retaguarda (CEMIG, 2017).

Se a filosofia de proteção coordenada for aplicada à rede da Figura 12, a mesma falta no ponto A tem um tratamento diferenciado. O primeiro dispositivo a atuar é R1, que abre pela função instantânea e religa após um tempo determinado. Se a falta for de natureza transitória, é eliminada e o fornecimento de energia se mantém. Caso a falta seja de natureza permanente, após o religamento de R1 é C1 quem interrompe permanentemente o fluxo de corrente no circuito.

2.7.3 *Crítérios para a seleção da filosofia de Proteção*

A escolha da filosofia de proteção a ser adotada numa rede de distribuição está diretamente ligada à natureza da carga e às características do alimentador. Alguns critérios práticos são definidos a seguir para facilitar essa tomada de decisão.

2.7.3.1 *Crítério da Densidade populacional*

A Densidade populacional ao longo de um alimentador é um indicador que condensa de maneira indireta mas eficiente uma série de características do alimentador e da carga a ser atendida (CEMIG, 2017).

Redes urbanas tendem a atender um maior número de pessoas por unidade de comprimento, além de serem naturalmente menos extensas, tornando-se redes de densidade alta. Redes rurais possuem características contrárias, atendendo menos consumidores e sendo mais extensas e, por consequência, bem menos densas.

Indica-se a proteção coordenada para redes rurais, tanto por evitarem o envio constante de equipes de manutenção para áreas mais afastadas, como por afetarem um número menor de consumidores ao eliminarem faltas transitórias.

Já em redes urbanas, é indicada a proteção seletiva por reduzir o número de consumidores atingidos por cada falta e por terem o tempo para o reestabelecimento reduzido, graças a proximidade das equipes de manutenção (CEMIG, 2017).

2.7.3.2 *Critério dos índices de continuidade*

Cada vez que uma falta ocorre na rede, a proteção interrompe o fornecimento de energia de uma parcela dos seus consumidores. O número de atingidos, o tempo entre a interrupção e o reestabelecimento e a quantidade de interrupções são alguns dos fatores relacionados à proteção que afetam os índices de continuidade da rede (CEMIG, 2017) definidos pela ANEEL. Cada um dos cinco índices descritos a seguir se relaciona com um ou mais desses fatores e o tipo de filosofia adotada tende a minimizar ou maximizar essa interferência.

Os índices afetados pela duração da interrupção são DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), DIC (Duração de interrupção individual por unidade consumidora) e DMIC (Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão). Aqueles afetados pela frequência com que o sistema é interrompido são FIC (Frequência de interrupção individual por unidade consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) (ANEEL, 2015).

Por depender do religamento, a proteção coordenada interrompe o circuito mais vezes a cada falta, piorando FEC e FIC. Por outro lado, faltas transitórias são eliminadas antes do religamento, o que reduz o tempo em que o sistema fica inoperante, melhorando os índices de DEC, DIC e DMIC. A proteção seletiva, por outro lado, atua apenas uma vez por falta e de maneira permanente, beneficiando FEC e FIC e prejudicando DEC, DIC e DMIC.

Em redes que atendam atividades de processos críticos como os de hospitais e bancos, que envolvem vidas humanas ou movimentação econômica virtual, devem ser estabelecidos requisitos de continuidade envolvendo limites aos índices de frequência e duração de interrupção

(CEMIG, 2017). Deve-se então escolher a filosofia que atenda de maneira mais eficaz a esses requisitos.

3 METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DO *SOFTWARE*

A constante evolução tecnológica que os dispositivos de proteção definidos no Capítulo 2 vêm apresentando culminou no constante aumento de complexidade das redes. Isso, o contexto histórico e os requisitos legais apresentados no Capítulo 1 aliados a necessidade de se calcular com maior fidelidade os curtos-circuitos e o fluxo de carga das redes levou ao desenvolvimento do MyGrid, *software* descrito naquele mesmo capítulo.

O passo seguinte seria a implementação do MyGrid.protect, um *software* para cálculo dos ajustes das proteções das redes radiais de distribuição de energia elétrica modeladas no MyGrid. Ele foi todo implementado visando atingir os objetivos da Seção 1.4, como um módulo independente, mas integrável ao *software* MyGrid. A integração a outros *softwares* de cálculo não foi implementada.

Para nortear a escolha da linguagem de programação e bibliotecas necessárias para a sua implementação foram definidos algumas funcionalidades mínimas que o *software* deveria possuir:

1. Capacidade de operar números complexos e funções matemáticas avançadas, fator essencial para se modelar redes elétricas, cujas grandezas são representadas quase que na totalidade por fasores;
2. Permitir a fácil inserção de novos elementos, adaptando-se às mudanças de topologia do sistema elétrico;
3. Capacidade de plotar gráficos, requisito necessário para a apresentação das curvas de tempo inverso de IEDs e chaves-fusíveis, permitindo a verificação rápida de coordenação e seletividade em todo o intervalo de coordenação apenas pelo posicionamento relativo entre as curvas e;
4. Interface gráfica, o que permite representar a topologia da rede, proporciona a identificação das zonas de proteção dos dispositivos, facilita a interação com os elementos da rede e seus parâmetros além de ser mais amigável ao usuário;

Outra forma de apresentação dos resultados foi considerada inicialmente, através do uso de tabelas, mas logo foi descartada por ter um poder de condensação de dados inferior àquela definida no requisito 3 e por tradicionalmente essa análise ser feita graficamente (GIGUER, 1988).

Dentre as linguagens de programação mais utilizadas atualmente, Python (PYTHON, 2019a) foi a selecionada para o desenvolvimento da aplicação por possuir um vasto conjunto

de bibliotecas que, associadas, cumprem todos os requisitos apresentados anteriormente. Outra vantagem que possui é que o seu padrão de desenvolvimento é Orientado a Objetos (POO), permitindo a criação e alteração de objetos pelo usuário enquanto a aplicação é executada. Além disso, cada objeto pode interagir com os demais através de métodos pré-programados, permitindo a simulação da interação entre os dispositivos da rede, cumprindo todo o requisito 2 apenas com a biblioteca padrão da linguagem (LOSI; RUSSO, 2005);

Para cumprir os requisitos 1 e 3, é necessário o uso das funções presentes nas bibliotecas SciPy, Numpy e Matplotlib. Juntas reúnem as funções para cálculos científicos (SciPy), matrizes multidimensionais (Numpy) e geração de gráficos (Matplotlib). As três são de código aberto e utilizam as mesmas estruturas de dados da biblioteca padrão do python, não sendo necessária a conversão ou o armazenamento de dados redundantes em diferentes estruturas (NUMPY DEVELOPERS, 2019; SCIPY DEVELOPERS, 2019; HUNTER *et al.*, 2012).

Por fim, optou-se pela biblioteca PySide2 (PYTHON, 2019b) para o cumprimento do requisito 4 por reunir um vasto acervo de objetos gráficos sensíveis às ações do usuário, permitindo a construção de uma interface interativa que apresenta visualmente a topologia dos IEDs e chaves-fusíveis ao longo da rede.

O fato do MyGrid ser desenvolvido em Python também impulsionou a decisão de implementar o MyGrid.protect na mesma linguagem, pois ambos os *softwares* se utilizariam de uma única estrutura para representar seus dados, sem necessidade de converter informações, reduzindo o tempo de processamento e a quantidade de informação armazenada.

3.1 Estrutura do MyGrid.protect

Quanto aos arquivos que a compoem, o MyGrid.protect é uma biblioteca que se divide em dois módulos menores: a protectCalc e a protectGraphics.

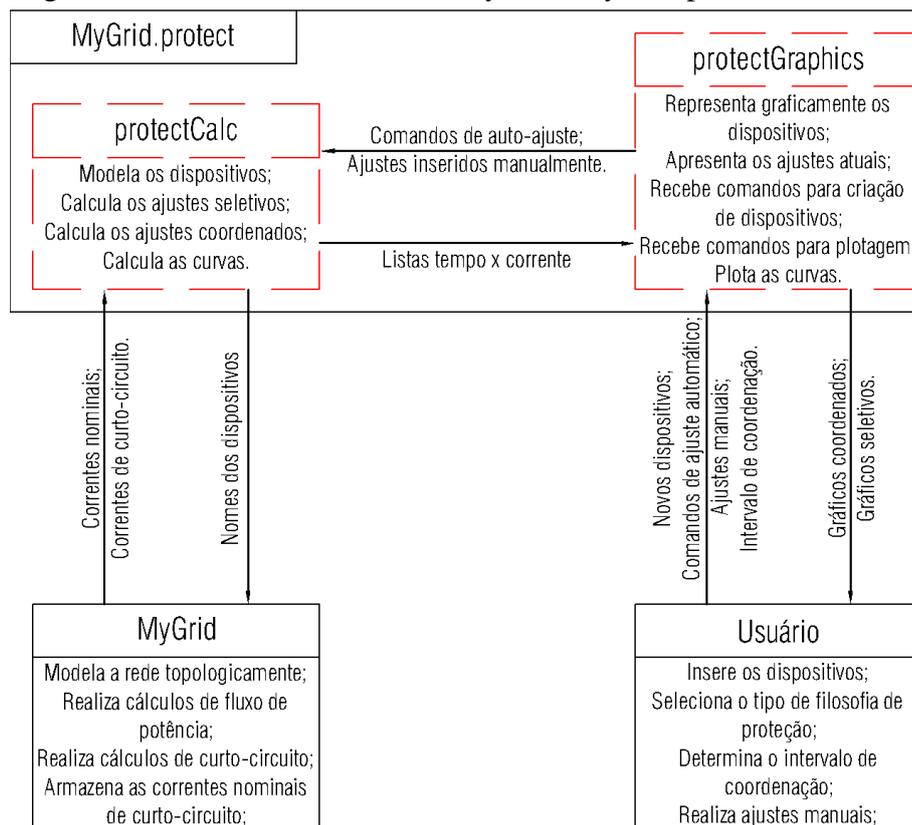
O módulo protectCalc, ou módulo de modelagem e cálculo, reúne as funções que criam modelos computacionais dos dispositivos de proteção do Sistema de Potência. Cada dispositivo possui métodos de auto-ajuste baseado nos níveis de curto do trecho da rede onde está instalado e é capaz de gerar a sua curva de tempo inverso, para que se realizem análises e estudos de coordenação e seletividade.

Diferentemente do MyGrid que reúne classes para modelagem de toda a estrutura da rede, incluindo condutores e barras, por exemplo, o MyGrid.protect contém apenas classes para chaves-fusíveis, elos-fusíveis, IEDs e a própria rede. Essa simplificação só é possível porque

os métodos de auto-ajuste de cada um desses elementos recebe os dados já calculados pelos métodos de fluxo de potência e curto-circuito realizados no MyGrid.

O módulo protectGraphics, ou módulo gráfico, reúne as funções que implementam a interface gráfica entre o usuário e o módulo de modelagem. Este módulo reúne os objetos gráficos que representam de maneira adequada a rede e cada um de seus dispositivos instalados, organizados de maneira semelhante a sua topologia física e cujos parâmetros são facilmente editáveis através de botões e janelas interativas. É o único módulo ao qual o usuário precisa acessar para inserir dispositivos e definir parâmetros, de modo que todas as funções do módulo protectCalc são acionadas pelo protectGraphics, não sendo necessário que o usuário precise conhecer as funções do outro módulo. A Figura 13 apresenta o fluxo de dados entre o usuário, uma rede previamente modelada no MyGrid e os dois módulos do MyGrid.protect.

Figura 13 – Fluxo de dados entre MyGrid, MyGrid.protect e Usuário.



Fonte: O Autor.

Os comandos para a criação de um novo dispositivo ou para a alteração dos parâmetros de um já existente são acionados na interface gráfica. De lá, esses dados são utilizados para se instanciar um novo objeto do módulo de modelagem, fazendo-se a associação entre o objeto gráfico e o modelo. Os objetos aqui criados não alteram a rede modelada no MyGrid e a

associação entre os dispositivos MyGrid e MyGrid.protect é feita pelos seus nomes, que devem ser iguais.

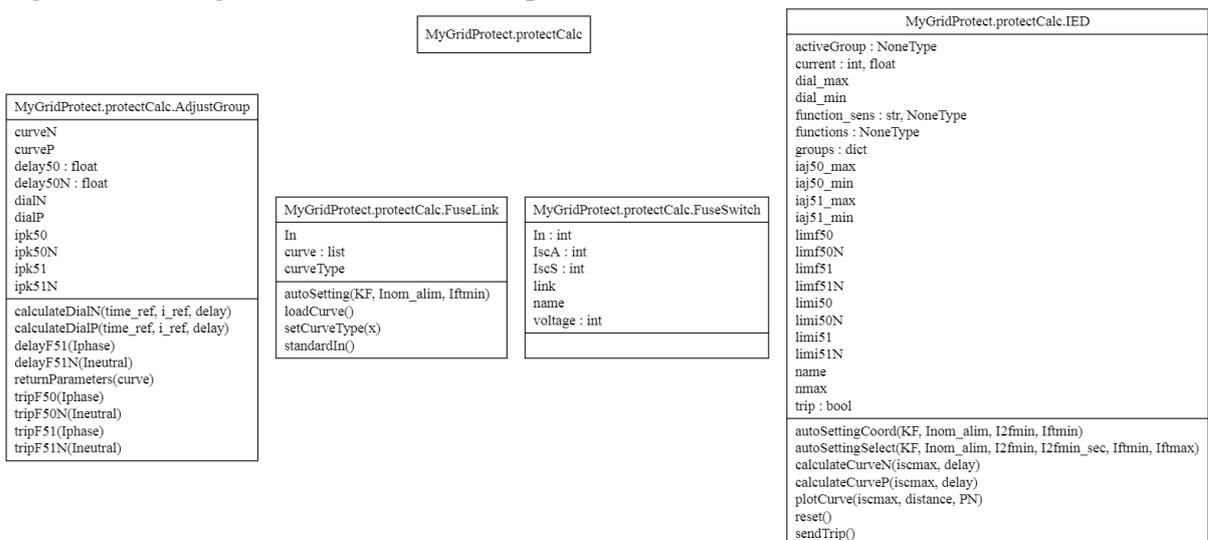
De maneira semelhante, as funções de auto-ajuste são acionadas na interface gráfica. Após selecionar-se o tipo de proteção, se deve ser coordenada ou seletiva, o comando é enviado a todos os objetos modelos, que buscam as informações de curto necessárias na rede previamente montada no MyGrid, realizam os cálculos de ajuste, alteram seus parâmetros, calculam e armazenam suas novas curvas em listas Python.

Após a criação dos dispositivos e a realização dos seus ajustes, é possível verificar-se a coordenação e ou seletividade dos mesmos pela análise gráfica do posicionamento relativo entre as curvas de cada dispositivo selecionado. O comando de geração dos gráficos, chamado doravante de "plotagem", é dado na interface gráfica, que buscará as curvas armazenadas em cada objeto modelo associado aos objetos gráficos selecionados. A seguir são plotadas no módulo gráfico, permitindo a sua análise.

3.2 Classes da biblioteca protectCalc

A Figura 14 apresenta o diagrama UML do módulo protectCalc. A seguir são apresentadas com mais detalhes as classes que modelam a rede e os seus dispositivos de proteção, os parâmetros que os definem e seus principais métodos.

Figura 14 – Diagrama UML do módulo protectCalc.



Fonte: O Autor.

3.2.1 Classe IED

Modela os IEDs e relés da rede como dispositivos microprocessados, capazes de executar as funções de proteção de sobrecorrente de todas as fases (50/51) e de neutro (50/51N) em um único dispositivo. Os objetos dessa classe possuem os métodos descritos nas subseções seguintes.

3.2.1.1 Método `__init__`

Método de criação do objeto, possui como parâmetros obrigatórios para sua execução, ou parâmetros de entrada, o nome do dispositivo, um objeto da classe `AdjustGroup` que reúne o grupo de ajustes ativo e uma lista de objetos da classe `CT` com os TCs instalados nas fases e no neutro da linha.

3.2.1.2 Método `calculateCurveP`

Método que calcula a curva de atuação das funções 50 e 51 do IED retornando-a na forma de uma lista 2x1 cujos elementos são uma lista com o tempo de atuação e outra com as correntes de curto de cada dispositivo. As listas são geradas a partir da Equação 2.1.

3.2.1.3 Método `calculateCurveN`

Método que calcula a curva de atuação das funções 50N e 51N do IED retornando-a na forma de uma lista 2x1 cujos elementos são uma lista com o tempo de atuação e outra com as correntes de curto de cada dispositivo. As listas são geradas a partir da Equação 2.1.

3.2.1.4 Método `autoSettingCoord`

Método que realiza o auto-ajuste das correntes de *pick up* das funções 50/51 e 50/51N do IED seguindo a filosofia coordenada de proteção, recebe como parâmetros de entrada o fator de crescimento da rede, a corrente de carga máxima no ponto de instalação, as correntes de curto-circuito bifásico mínima e monofásico a terra mínima. O valores das correntes de *pick up* 50, 51, 50N e 51N são alterados para atender aos limites definidos na literatura.

nas Equações , 3.7 de (ELETROBRÁS, 1982; GIGUER, 1988) e 3.8 (GIGUER, 1988)

Os limites superior e inferior para *pick up* da Unidade Temporizada de Fase são definidos pelas Equações

$$I_{pick\ up51} \geq I_{carga} \times KF \quad (3.1)$$

onde:

- KF é o fator de crescimento da carga, adotado como 1;
- I_{carga} é a corrente de carga máxima considerando as condições de manobra e o crescimento da carga, adotado 1,5 a 2 corrente nominal.

$$I_{pick\ up51} \leq \frac{I_{2F_{min}}}{FS \times FI} \quad (3.2)$$

onde:

- $I_{2F_{min}}$ é a corrente bifásica mínima no final do trecho protegido pelo relé;
- FI é o fator de início da curva do relé definida pelo fabricante. Geralmente as curvas dos relés iniciam a partir de 1,5 a 2 vezes o *tape* e;
- FS é um fator de segurança;

Já os limites superior e inferior para *pick up* da Unidade Temporizada de Neutro definidos pelas Equações 3.3 e 3.4, ambas pela combinação dos critérios de (CPFL, 2016; ALBINI, 2003),

$$I_{pick\ up51N} \geq (0,1 \text{ a } 0,3) \times I_{carga} \quad (3.3)$$

onde:

- $(0,1 \text{ a } 0,3)$ representa a faixa admissível para a corrente de desequilíbrio, ou seja, de 10 a 30% da corrente de carga máxima;
- I_{carga} é a corrente de carga máxima considerando as condições de manobra e o crescimento da carga.

$$I_{pick\ up51N} \leq \frac{I_{FT_{min}}}{FS \times FI} \quad (3.4)$$

onde:

- $I_{FT_{min}}$ é o curto-circuito mínimo calculado com uma impedância de contato de 40 Ω , no final do trecho protegido pelo relé;
- FI é o fator de início da curva do relé;
- FS é um fator de segurança;

Para o *pick up* da Unidade Instantânea de Fase, foi utilizada a Equação 3.5 como limite superior pelo critério de (ALBINI, 2003) e a Equação 3.6 como limite superior pelo critério de (GIGUER, 1988).

$$I_{pick\ up50} \geq (3\ a\ 8) \times I_{carga} \quad (3.5)$$

onde:

- $(3\ a\ 8)$ é o valor de uma constante a ser considerada para representar a corrente de energização do circuito;
- I_{carga} é a corrente de carga máxima considerando as condições de manobra e o crescimento da carga.

$$I_{pick\ up50} \leq I_{2F_{min}} \quad (3.6)$$

onde:

- $I_{2F_{min}}$ é a corrente bifásica mínima no final do trecho protegido pelo relé.

Para o *Pick up* da Unidade Instantânea de Neutro, os limites superior e inferior são definidos pela combinação dos critérios de (CPFL, 2016; ALBINI, 2003) nas Equações 3.7 e 3.4.

$$I_{pick\ up50N} \geq \{(0,1\ a\ 0,3) \times I_{carga} \quad (3.7)$$

onde:

- $(0,1\ a\ 0,3)$ representa a faixa admissível para a corrente de desequilíbrio, ou seja, de 10 a 30% da corrente de carga máxima;
- I_{carga} é a corrente de carga máxima considerando as condições de manobra e o crescimento da carga.

$$I_{pick\ up50N} \leq I_{FT_{min}} \quad (3.8)$$

onde:

- $I_{FT_{min}}$ é o curto-circuito mínimo calculado com uma impedância de contato de 40Ω , no final do trecho protegido pelo relé.

3.2.1.5 Método *autoSettingSelect*

Método que realiza o auto-ajuste das correntes de *pick up* das funções 50/51 e 50/51N do IED seguindo a filosofia seletiva de proteção, recebe como parâmetros de entrada o fator de crescimento da rede, a corrente de carga máxima no ponto de instalação, as correntes de curto-circuito bifásico mínima e monofásico a terra mínima e máxima. O valores das correntes de *pick up* 51 e 51N seguem o já definido nas Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

Para as funções 50 e 50N, as correntes de *pick up* são ajustados para atender os limites mínimos definidos pelos critérios de (CPFL, 2016; GIGUER, 1988) nas Equações 3.9 e 3.10, respectivamente.

$$I_{pick\ up50} > I_{2F_{min}} \quad (3.9)$$

onde:

- $I_{2F_{min}}$ é a corrente bifásica mínima no limite da zona de proteção da unidade instantânea.

$$I_{pick\ up50N} > I_{FT_{min}} \quad (3.10)$$

onde:

- $I_{FT_{min}}$ é o curto-circuito fase-terra assimétrico máximo calculado com uma impedância de contato igual a zero no limite da zona de proteção da unidade instantânea.

3.2.2 Classe *FuseSwitch*

Modela as chaves-fusíveis utilizadas na rede. Os objetos dessa classe possuem apenas o método de criação de objeto, pois todos os cálculos são realizados na classe *FuseLink*, que modela os elos-fusíveis. Os parâmetros de entrada desse método são o nome do dispositivo e um objeto da classe *FuseLink* que modela o elo associado à chave.

3.2.3 Classe FuseLink

Modela os elos fusíveis associados a cada uma das chaves-fusíveis utilizadas na rede. Os objetos dessa classe possuem os métodos descritos nas subseções seguintes.

3.2.3.1 Método `__init__`

Método de criação do objeto, possui como parâmetros obrigatórios para sua execução, ou parâmetros de entrada, o nome do dispositivo, o tipo do elo-fusível e a sua corrente nominal.

3.2.3.2 Método `loadCurve`

Método que busca em um banco de dados armazenado em arquivo de tabela formato .xlsx as curvas de fusão máxima e mínima do elo. O retorno desse método é uma lista 4x1 cujos elementos são outras quatro listas que armazenam duas a duas os tempos de fusão máximo e mínimo para cada valor determinado de sobrecorrente.

3.2.3.3 Método `autoSetting`

Método de determinação do elo fusível a ser utilizado, recebe como parâmetros de entrada as correntes de curto-circuito monofásica a terra mínima e a corrente de carga máxima no ponto de instalação. O valor da corrente nominal é alterada para atender aos limites estabelecidos na equação 3.11 por (CPFL, 2016; GIGUER, 1988; ALBINI, 2003).

$$KF \times I_{carga} < I_{elo} \leq \frac{1}{4}(I_{FT_{min}}) \quad (3.11)$$

onde:

- KF é o fator de crescimento da carga, definido como 1;
- I_{carga} é a corrente de carga máxima atual no ponto de instalação, considerando manobras e o crescimento da carga; De maneira geral I_{carga} é de 1,5 a 2 vezes a corrente nominal do alimentador;
- I_{elo} é a corrente nominal do elo-fusível.
- $I_{FT_{min}}$ é a corrente de curto-circuito mínima no trecho a ser protegido.

3.2.4 Classe *PowerGrid*

Modela a rede de distribuição elétrica. Os objetos dessa classe possuem os métodos descritos nas subseções seguintes.

3.2.4.1 Método *__init__*

Método de criação do objeto, possui como parâmetros obrigatórios para sua execução, ou parâmetros de entrada, a lista de dispositivos de proteção da rede. Esses dispositivos podem ser objetos das classes IED ou FuseSwitch.

3.2.4.2 Método *autoSettingCoord*

Método que envia para todos os IEDs e Chaves-Fusíveis da rede o comando de auto-ajuste seguindo a filosofia de proteção coordenada, junto com os parâmetros necessários para cada um deles. Recebe como parâmetro de entrada a rede previamente modelada no MyGrid.

3.2.4.3 Método *autoSettingSelect*

Método que envia para todos os IEDs e Chaves-Fusíveis da rede o comando de auto-ajuste seguindo a filosofia de proteção seletiva, junto com os parâmetros necessários para cada um deles. Recebe como parâmetro de entrada a rede previamente modelada no MyGrid.

3.2.4.4 Método *autoSwSwSelect*

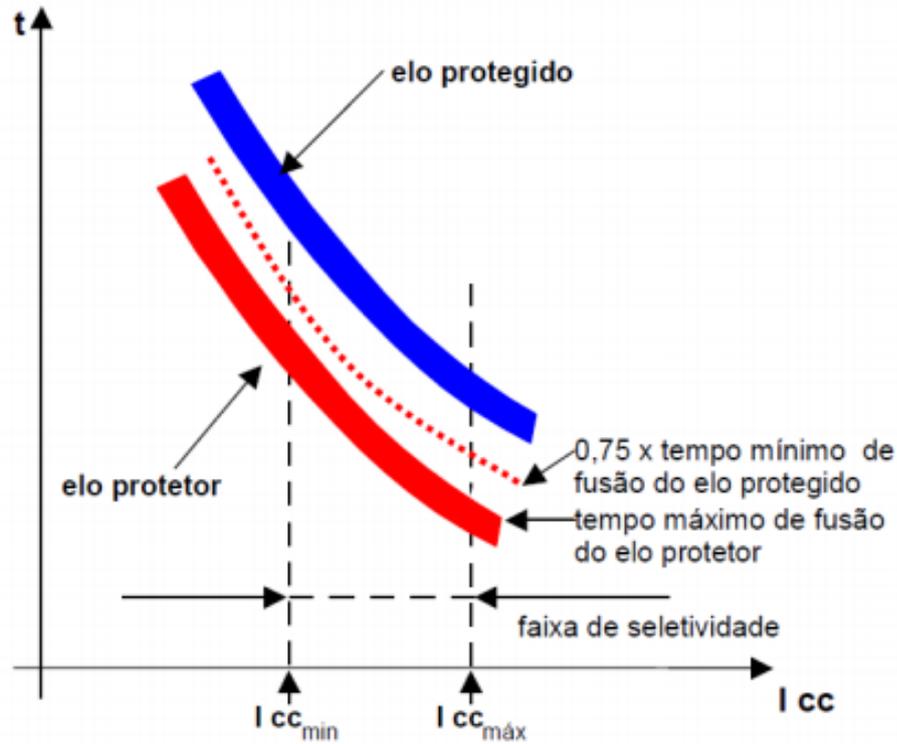
Método que verifica a seletividade entre duas chaves-fusíveis em cascata e redimensiona o elo-fusível da chave mais montante em caso negativo. A verificação é feita aplicando-se os valores obtidos das duas curvas, conforme Figura 15, na Equação 3.12 de (CEMIG, 2017).

$$t_1 \leq t_2 \times 0,75 \tag{3.12}$$

onde:

- t_1 é o tempo de fusão máximo do elo-fusível a jusante para a sua corrente nominal e ;
- t_2 é o tempo de fusão mínimo do elo-fusível a montante para a sua corrente nominal.

Figura 15 – Critério gráfico para verificação da seletividade entre elos-fusíveis.



Fonte: O Autor.

3.2.4.5 Método autoIEDSwCoord

Método que realiza o auto-ajuste do dial de tempo de fase e do dial de tempo de neutro das funções 50 e 50N de um IED que esteja a montante de uma chave-fusível seguindo a filosofia coordenada de proteção. Recebe como parâmetros os dois dispositivos. O dial de tempo é calculado pela equação 3.13, que por sua vez é uma variação da equação 2.1 utilizando os valores das curvas da chave e o intervalo de coordenação como referência.

$$Dial = \frac{T_{ref} + t_c}{\beta} \times \left[\left(\frac{I_{ref}}{I_{pick\ up51}} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (3.13)$$

onde:

- T_{ref} tempo de referência, em segundos. Adotado o tempo de fusão máximo do elo-fusível ao ser percorrido por I_{ref} ;
- t_c intervalo de coordenação, em segundos. Definido na janela principal;
- $Dial$ dial de tempo;

- I_{ref} corrente de referência, em Ampères. Adotado $I_{ref} < I_{pick\ up}$ instantânea do IED.
- $I_{pick\ up51}$ corrente de *pick up* temporizada ajustada no IED, em Ampères;
- α, β constantes normalizadas.

3.2.4.6 Método *autoIEDSwSelect*

Método que realiza o auto-ajuste do dial de tempo de fase e do dial de tempo de neutro das funções 50 e 50N de um IED que esteja a montante de uma chave-fusível seguindo a filosofia seletiva de proteção. Recebe como parâmetros os dois dispositivos. O dial de tempo é calculado pela equação 3.13, que por sua vez é uma variação da equação 2.1 utilizando os valores das curvas da chave e o intervalo de coordenação como referência.

3.2.4.7 Método *autoIEDIEDSelect*

Método que realiza o auto-ajuste do dial de tempo de fase e do dial de tempo de neutro das funções 50 e 50N de um IED que esteja a montante de outro IED seguindo a filosofia seletiva de proteção. Recebe como parâmetros dois IEDs em cascata: aquele a ser ajustado e o imediatamente à jusante. O dial de tempo é calculado pela Equação 3.14, que por sua vez é uma variação da Equação 2.1 utilizando os valores do IED à jusante e o intervalo de coordenação como referência.

$$Dial = \frac{T_{ref} + t_c}{\beta} \times \left[\left(\frac{I_{ref}}{I_{pick\ up51}} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (3.14)$$

onde:

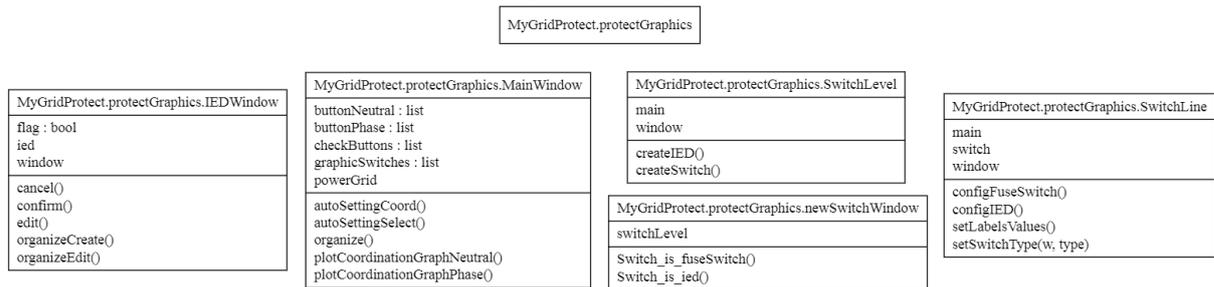
- T_{ref} tempo de referência, em segundos. Adotado tempo de atuação do IED a jusante ao ser percorrido por I_{ref} ;
- t_c intervalo de coordenação, em segundos. Definido na janela principal;
- $Dial$ dial de tempo;
- I_{ref} corrente de referência, em Ampères. Adotado $I_{pick\ up}$ instantânea do IED a jusante.
- $I_{pick\ up51}$ corrente de *pick up* temporizada ajustada no IED a montante, em Ampères;

- α , β constantes normatizadas.

3.3 Classes da biblioteca protectGraphics

A Figura 16 apresenta o diagrama UML do módulo protectCalc. A seguir são apresentadas as classes gráficas associadas aos dispositivos modelados no módulo MyGrid.protectCalc, sua aparência, parâmetros e seus métodos.

Figura 16 – Diagrama UML do módulo protectGraphics



Fonte: O Autor.

3.3.1 Classe MainWindow

É a janela principal da aplicação, onde estão contidos a representação gráfica da rede, os botões para plotar os coordenogramas de fase e neutro e o de fechar a aplicação. Apenas um objeto dessa classe é criado por cada vez que se executa a aplicação e apenas no início da mesma. Cada objeto dessa classe possui os métodos descritos nas subseções seguintes.

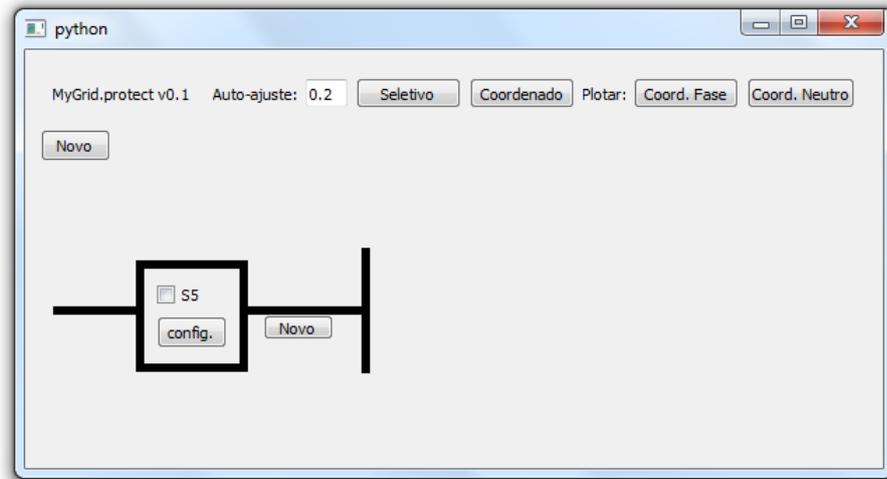
3.3.1.1 Método `__init__`

Método de criação do objeto, possui como parâmetros obrigatórios para sua execução, ou parâmetros de entrada, um objeto da classe PowerGrid que modela a rede de distribuição e os dispositivos de proteção modelados no módulo MyGrid.protectCalc. Esses dispositivos podem ser objetos das classes IED ou FuseSwitch. A Figura 17 apresenta a aparência dessa janela.

3.3.1.2 Método `plotCoordinationGraphPhase`

Método que plota as curvas de atuação de fase de todos os IEDs e chaves selecionados sempre que o botão "Plotar Coordenograma de Fase" é clicado. O método utiliza a função de plotagem logarítmica da biblioteca matplotlib para plotar as curvas, ponto a ponto, através das

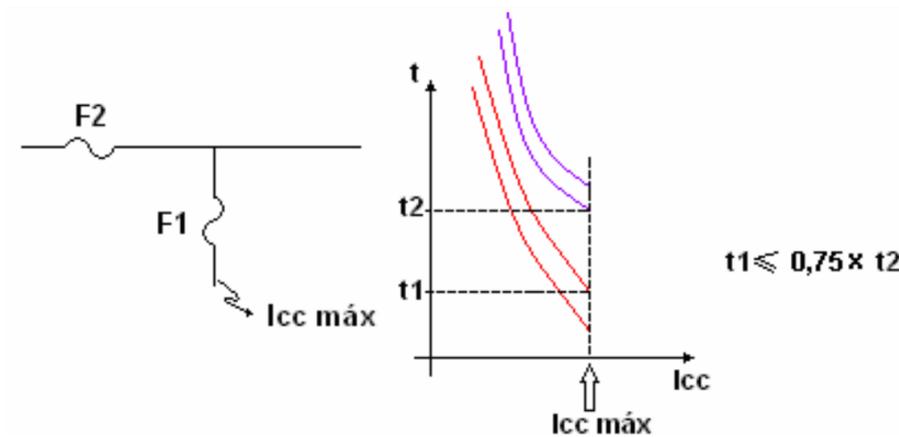
Figura 17 – Aparência da janela MainWindow.



Fonte: O Autor.

listas de tempo e corrente geradas pelos objetos IED e FuseSwitch. A Figura 18 apresenta o coordenograma entre as curvas de uma chave-fusível e a de um IED.

Figura 18 – Critério gráfico e lógico para seletividade entre elos-fusíveis de um circuito fictício.



Fonte: (PEREIRA, 2007)

3.3.1.3 Método *plotCoordinationGraphNeutral*

Método que plota as curvas de atuação de neutro de todos os IEDs e chaves selecionados sempre que o botão "Plotar Coordenograma de Neutro" é clicado. O método plota as curvas de maneira idêntica ao método anterior, mas utilizando as listas com os valores de neutro geradas pelos objetos IED e FuseSwitch.

3.3.2 Classe *SwitchLine*

É o elemento gráfico que representa uma chave-fusível ou um IED do sistema e possui uma aparência para cada um, selecionada por método específico. Cada objeto dessa classe possui os métodos descritos nas subseções seguintes.

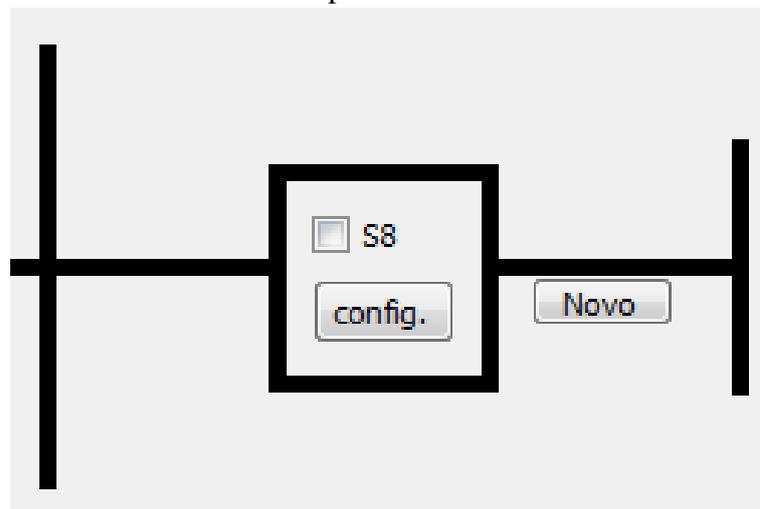
3.3.2.1 Método `__init__`

Método de criação do objeto, possui como parâmetros obrigatórios para sua execução, ou parâmetros de entrada, um objeto que pode ser da classe IED ou FuseSwitch, e um objeto da classe MainWindow onde o objeto SwitchLine será exibido.

3.3.2.2 Método `setSwitchType`

Método que define a aparência do objeto de acordo com o objeto modelo (IED ou chave-fusível) associado. Recebe como parâmetro o layout da SwitchLine e o tipo do dispositivo. Quando o dispositivo for um IED, sua aparência é a da figura 19, com botão de seleção ao lado do nome e botão para configuração abaixo do mesmo.

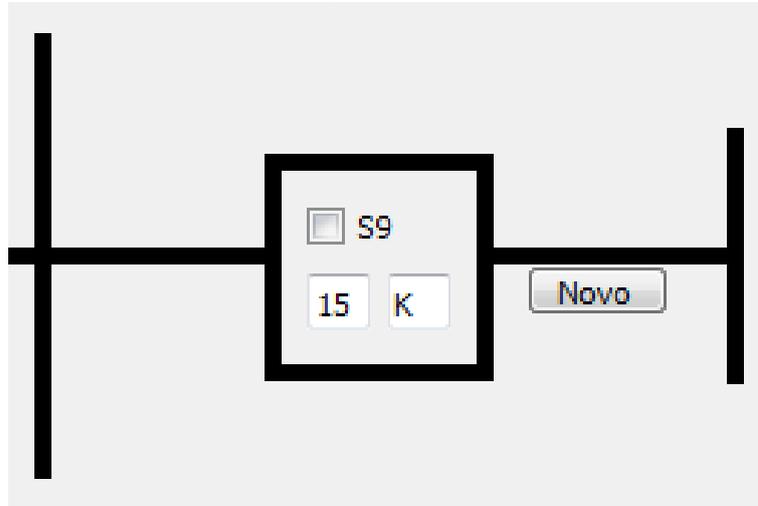
Figura 19 – Aparência de um objeto gráfico da classe SwitchLine do tipo IED.



Fonte: O Autor.

Quando o dispositivo for uma chave-fusível, sua aparência é a da Figura 20, com botão de seleção ao lado do nome do dispositivo e ambos acima de dois campos onde se preenchem a corrente nominal e o tipo do elo-fusível.

Figura 20 – Aparência de um objeto gráfico da classe SwitchLine do tipo chave-fusível.



Fonte: O Autor.

3.3.2.3 Método *configFuseSwitch*

Método que reajusta o elo-fusível da chave sempre que um dos campos sofre alteração.

3.3.2.4 Método *configIED*

Método que abre a janela de configuração dos parâmetros do IED sempre que o botão config. é pressionado. A janela acionada é da classe IEDWindow e será melhor abordada em 3.3.4.

3.3.3 Classe *SwitchLevel*

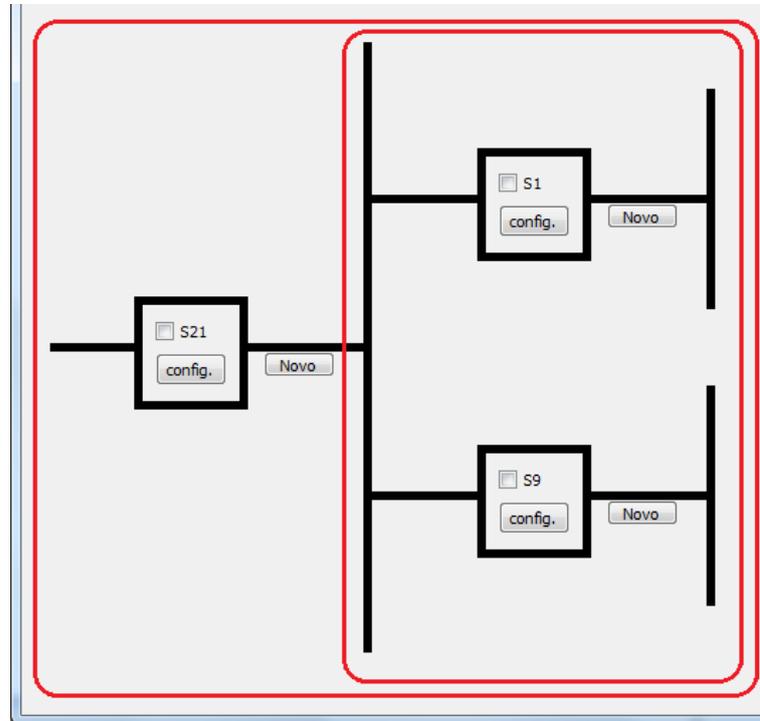
É o elemento gráfico no qual se permite a inserção de objetos do tipo SwitchLine paralelamente, representando uma nova profundidade da rede. Cada objeto dessa classe possui os métodos descritos nas subseções seguintes.

3.3.3.1 Método *__init__*

Método de criação do objeto, possui como parâmetros obrigatórios para sua execução, ou parâmetros de entrada, o layout do objeto SwitchLine a montante e o objeto da classe MainWindow onde será exibido. A Figura 21 mostra a aparência de dois desses elementos. O primeiro contém todos os IEDs e o segundo somente aqueles que estão a jusante do primeiro

IED.

Figura 21 – Aparência de dois objetos gráficos da classe SwitchLevel.



Fonte: O Autor.

O botão "novo", apesar de estar posicionado junto ao IED a montante, é criado aqui e está conectado ao método de criação dos novos objetos da classe SwitchLine a serem inseridos dentro do objeto SwitchLevel em questão.

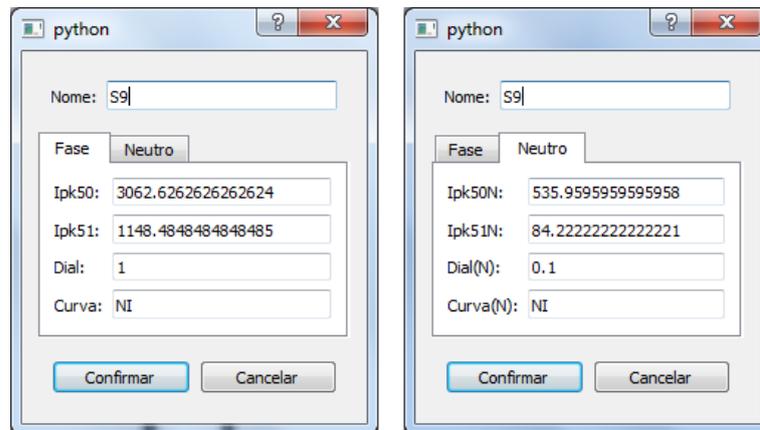
3.3.3.2 Método *createSwitch*

Método que exibe a janela do tipo diálogo que é objeto da classe *newSwitchWindow*. Este método é executado sempre que o botão "novo" é pressionado.

3.3.4 Classe *IEDWindow*

É a janela de diálogo onde se criam e configuram objetos da classe IED. Como se pode ver na Figura 22, composta por diversos campos onde se pode preencher parâmetros como o nome do IED, as correntes de *pick up* de todas as suas funções, o dial de fase, o dial de neutro e o tipo de curva das funções temporizadas. Além desses campos, possui mais dois botões "confirmar" ou "editar", a depender do momento em que a janela foi aberta e "cancelar". Cada objeto dessa classe possui os métodos descritos nas subseções seguintes.

Figura 22 – Aparência da janela da classe IEDWindow ao criar novo IED.



Fonte: O Autor.

3.3.4.1 Método `__init__`

Método de criação do objeto, possui como parâmetros obrigatórios para sua execução, ou parâmetros de entrada, o objeto da classe IED ao qual está associado e o objeto da classe SwitchLevel. Se for acionado por um botão "novo", o botão exibido será "confirma", do contrário será "editar".

3.3.4.2 Método `organizeCreate`

Método que configura os campos a serem exibidos no objeto caso o método de criação tenha sido executado após clicar o botão "novo". Além de exibir o primeiro botão como "confirma", o campo do nome do IED passa a ser editável como mostra a Figura 22.

3.3.4.3 Método `organizeEdit`

Método que configura os campos a serem exibidos no objeto caso o método de criação tenha sido executado após clicar o botão "config". Além de exibir o primeiro botão como "editar", o campo do nome do IED passa a ser fixo como mostra a Figura 24.

3.3.4.4 Método `confirm`

Método executado clicando-se no botão "confirmar". Fecha a janela e em seguida insere um novo objeto da classe SwitchLine associado a um objeto IED dentro da SwitchLevel passada como parâmetro no método de criação.

Figura 23 – Aparência da janela da classe IEDWindow ao editar ajustes de IED.



Fonte: O Autor.

3.3.4.5 Método edit

Método executado clicando-se no botão "editar". Fecha a janela e em seguida altera os parâmetros do objeto IED associado ao objeto SwitchLine passado como parâmetro no método de criação.

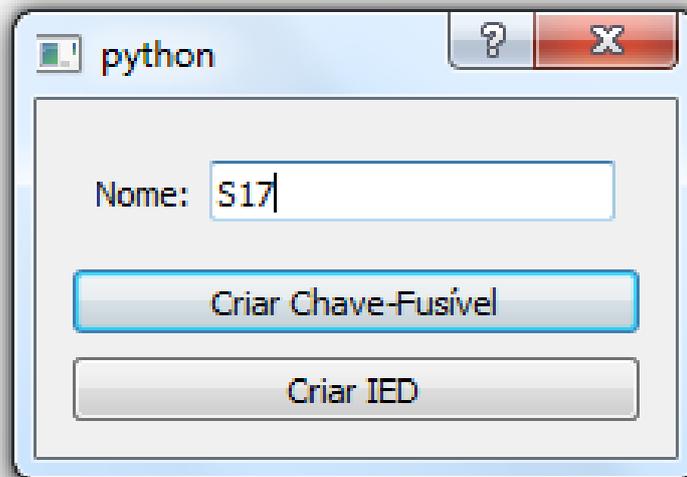
3.3.4.6 Método cancel

Método executado clicando-se no botão cancelar. Fecha a janela sem realizar qualquer modificação nos elementos do sistema.

3.3.5 Classe newSwitchWindow

É a janela de diálogo onde se define qual será o tipo de dispositivo a ser criado. Nela estão contidos apenas dois botões "Criar Chave-Fusível" e "Criar IED", conforme pode ser visto na figura 24.

Figura 24 – Aparência da janela da classe newSwitchWindow.



Fonte: O Autor.

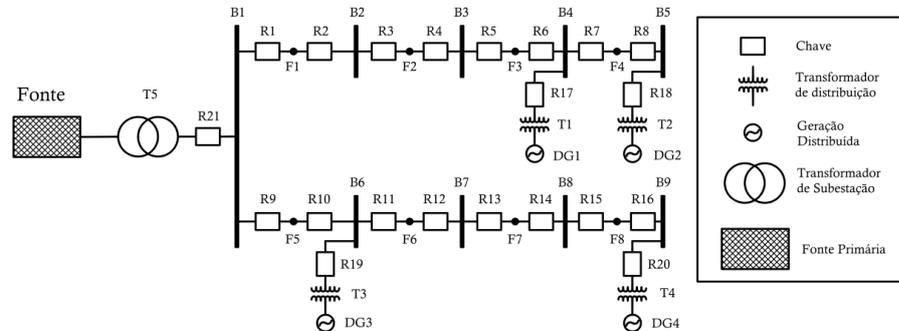
Cada objeto dessa classe possui apenas três métodos. O método de criação (`__init__`), que configura e exibe a janela e tem como parâmetro de entrada um objeto da classe `SwitchLevel`, e os que são chamados quando um dos dois botões é pressionado. Ao pressionar "Criar IED", o método `Switch_is_ied` fecha o objeto `newSwitchWindow` e abre uma nova janela de diálogo da classe `IEDWindow`. Já ao pressionar o botão restante, o método executado é o `Switch_is_fuseSwitch` que também fecha a janela e em seguida insere um novo objeto da classe `SwitchLine` associado a um objeto `FuseSwitch` dentro da `SwitchLevel` passada como parâmetro no método de criação.

4 ESTUDO DE CASO

Para a apresentação das funcionalidades do programa e validar seus métodos automáticos de ajuste, foi escolhida uma rede que inclui: linhas desequilibradas, devido a não-trasposição; cargas de potência e impedância constantes concentradas nas barras do sistema; uma proteção a jusante e outra a montante de cada barra; modelo em formato MyGrid validado (JUREMA, 2019) e disponível online para pesquisa e contribuição (GREI, 2019).

A rede em questão, que passará a ser denominada como Rede Canadense de Distribuição, foi disponibilizada no artigo de (DEHGHANPOUR *et al.*, 2018) e tem a topologia da Figura 25. Os dados necessários aos cálculos foram reunidos na Tabela 4.

Figura 25 – Topologia da Rede de Distribuição Canandense.



Fonte: (DEHGHANPOUR *et al.*, 2018)

Tabela 4 – Dados da Rede Canandense de Distribuição (RCD)

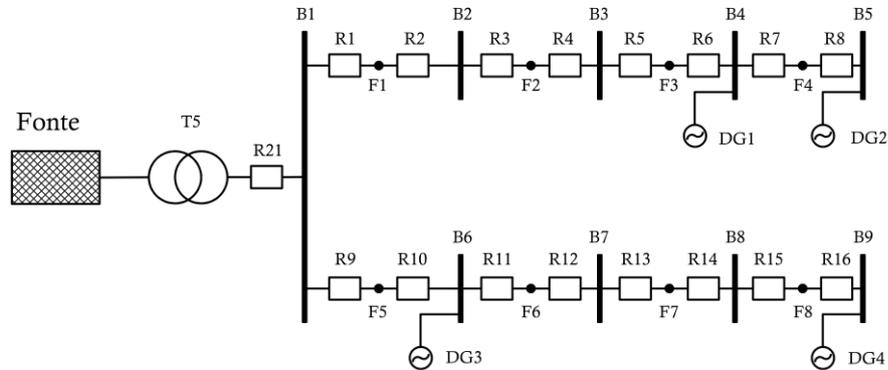
Rede Principal	500 MVA; 115 kV
GD's	3MVA; 480 V; $X'd = 0,2$ pu
Transformadores T1 à T2	12,47/0,48 kV; 5MVA; $X_t = 0,1$ pu
Transformadores T5	115/12,47 kV; 20MVA; $X_t = 0,1$ pu
Cargas nas barras B2 à B9	2MVA; $f.p = 0.9$
Comprimento das Linhas	0,5 milhas
Condutor Fase	250 MCM HdCu - 12s
Condutor Neutro	1/0 ACSR 6/1
Posição das fases e do neutro (um condutor por fase/neutro)	$a = 0 + j29$; $b = 2,5 + j29$; $c = 7 + j29$; $n = 4 + j25$ [pés]

Fonte: (JUREMA, 2019)

Para que fosse possível a sua modelagem para cálculos de fluxo de potência e curto-circuito pelo MyGrid, a Rede Canandense de Distribuição (RCD) foi adaptada por (JUREMA, 2019), eliminando-se as proteções e transformadores entre as barras e as GDs, conforme pode ser vista na Figura 26. Outra adaptação da RCD chamada Rede Canandense Adaptada de Distribuição (RCAD) e cuja topologia é a da Figura 27, é a que terá as suas proteções ajustadas pelo MyGrid.protect. A RCAD foi obtida reduzindo-se a carga de B5 em 60% e desconsiderando

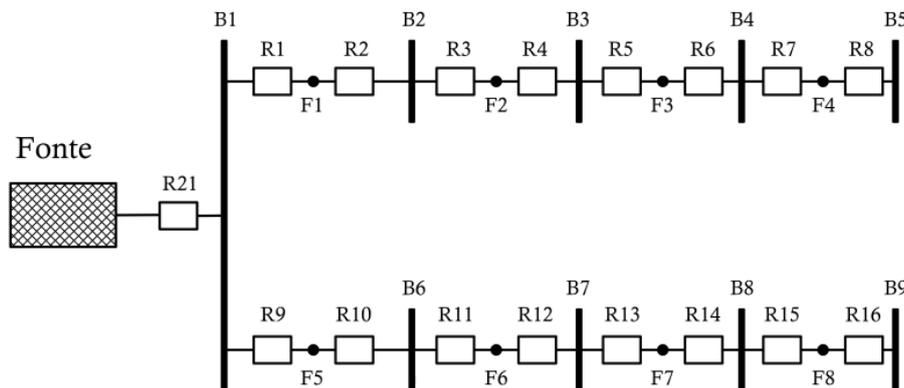
as gerações distribuídas.

Figura 26 – Topologia da Rede de Distribuição Canandense Adaptada com GD.



Fonte: (JUREMA, 2019)

Figura 27 – Topologia da Rede de Distribuição Canandense Adaptada sem GD.



Fonte: O Autor.

Conforme as Equações 3.1 a 3.11 do Capítulo 3, as correntes nominais e de curto-circuito de cada alimentador (F1 a F8) e barra (B1 a B9) da rede são necessárias para o ajuste das proteções. Com o intuito de obter essas correntes, o fluxo de carga e curto-circuito do MyGrid foram executados nessa rede. Os dados foram reunidos nas Tabelas 6 e 5.

Analisando rapidamente os dados de correntes nominais e de curto das Tabelas 6 a 5 e visando evitar repetições desnecessárias, optou-se por fazer a análise apenas do ramo de maior corrente.

Quanto a seleção do tipo de dispositivo de proteção que as chaves (R1 a R16) representam, se IED ou chave-fusível, optou-se por chave-fusível para os dois elementos mais a jusante de cada ramal (R7 e R8) e religadores para os demais. Essa decisão se justifica porque:

- as correntes nas barras B4 e à montante dos mesmos ultrapassam os 200A, inviabilizando o uso de chaves-fusíveis normatizadas pela (ABNT, 2011) e;
- deve-se respeitar o limite de 3 chaves-fusíveis em cascata (PEREIRA, 2007; CPFL, 2016; ALBINI, 2003), sob pena de não ser possível a coordenação.

Tabela 5 – Correntes Nominais Calculadas no MyGrid.

Nó/Barra	I_{Anom}	I_{Bnom}	I_{Cnom}
B1	765.0	747.0	754.0
B2	348.0	341.0	343.0
B3	248.0	242.0	244.0
B4	146.0	142.0	143.0
B5	42.0	41.0	41.0
B6	417.0	406.0	411.0
B7	317.0	307.0	311.0
B8	213.0	206.0	209.0
B9	107.0	103.0	105.0
F1	348.0	341.0	343.0
F2	248.0	242.0	244.0
F3	146.0	142.0	143.0
F4	42.0	41.0	41.0
F5	417.0	406.0	411.0
F6	317.0	307.0	311.0
F7	213.0	206.0	209.0
F8	107.0	103.0	105.0

Fonte: O Autor.

Tabela 6 – Curto-Circuitos calculados no MyGrid.

Nó/Barra	I_{ccFT}	$I_{ccFTmin}$	I_{cc2F}	I_{cc2FT}	I_{cc3F}	I_{cc3FT}
B1	9316.0	210.0	7615.0	9181.0	8793.0	8787.0
B2	4390.0	294.0	4983.0	5373.0	5762.0	5742.0
B3	3303.0	263.0	3893.0	4117.0	4513.0	4498.0
B4	3023.0	236.0	3348.0	3623.0	3890.0	3880.0
B5	2453.0	224.0	2754.0	2991.0	3204.0	3196.0
B6	4692.0	283.0	5084.0	5484.0	5882.0	5864.0
B7	3028.0	258.0	3652.0	3840.0	4236.0	4222.0
B8	2400.0	237.0	2918.0	3084.0	3391.0	3380.0
B9	2118.0	222.0	2481.0	2675.0	2888.0	2880.0
F1	5787.0	306.0	5972.0	6604.0	6897.0	6873.0
F2	3688.0	277.0	4337.0	4620.0	5023.0	5005.0
F3	3101.0	250.0	3577.0	3795.0	4151.0	4138.0
F4	2678.0	231.0	3013.0	3254.0	3502.0	3493.0
F5	5975.0	298.0	6035.0	6688.0	6972.0	6950.0
F6	3630.0	272.0	4234.0	4494.0	4905.0	4888.0
F7	2650.0	247.0	3233.0	3396.0	3754.0	3741.0
F8	2231.0	229.0	2674.0	2850.0	3110.0	3100.0

Fonte: O Autor.

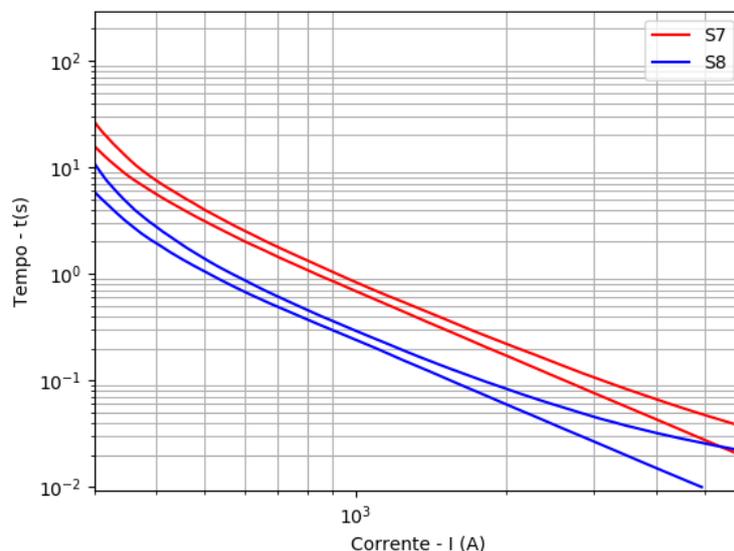
Após essas definições iniciais, a RCAD foi montada no MyGrid e no MyGrid.protect, tomando-se o cuidado de manter os dispositivos inseridos no MyGrid.protect com o mesmo nome dos que os representam no MyGrid.

Com uma margem de coordenação de 0,2s entre um dispositivo e outro, foram executados os ajustes automáticos seguindo a filosofia coordenada e protegida. Os resultados serão apresentados nas seções seguintes comparando-se as curvas dos dispositivos protegido e protetor de cada trecho e verificando se os requisitos de coordenação ou seletividade foram atendidos.

4.1 Seletividade R7 (protegido) – R8 (protetor)

Os elos selecionados pelo ajuste automático nas chaves-fusíveis R7 e R8 foram 100T e 100K, respectivamente. Para análise da seletividade, as curvas de ambos foram plotadas na Figura 28.

Figura 28 – Curvas dos tempos de fusão máximo e mínimo *versus* corrente dos elos R7 e R8.



Fonte: O Autor.

Pelo critério estabelecido por (CEMIG, 2017) para garantir a seletividade entre chaves, é necessário que o tempo de fusão máxima da chave a jusante seja menor que 75% do tempo de fusão mínima da chave a montante. Após a análise do gráfico, verificamos que a proteção é seletiva em torno de 1000A.

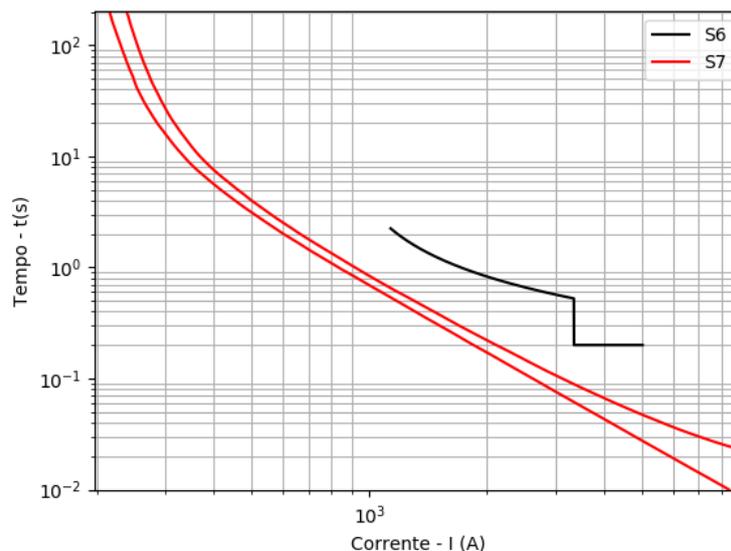
4.2 Seletividade R6 (protegido) – R7 (protetor)

O elo selecionado pelo ajuste automático na chave-fusível R7 se mantém como no item anterior. Já o grupo de ajustes do IED R6 segue na Figura 29. Para análise da seletividade, as curvas de ambos foram plotadas na Figura 30.

Figura 29 – Ajustes do IED R6.

Fonte: O Autor.

Figura 30 – Curvas de tempo máximo e mínimo *versus* corrente do IED e do elo R7.



Fonte: O Autor.

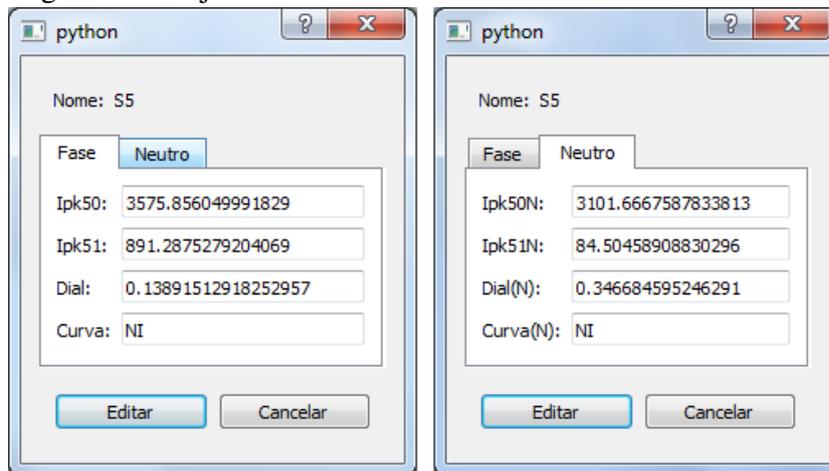
Para esse par de dispositivos, a proteção é seletiva pois, para todos os valores de corrente para os quais o IED é sensibilizado, a curva do tempo máximo de fusão do elo-fusível está abaixo da curva do IED. Isso significa que para qualquer sobrecorrente a jusante da chave, o

elo-fusível irá fundir antes do IED comandar a abertura do circuito.

4.3 Seletividade R5 (protegido) – R6 (protetor)

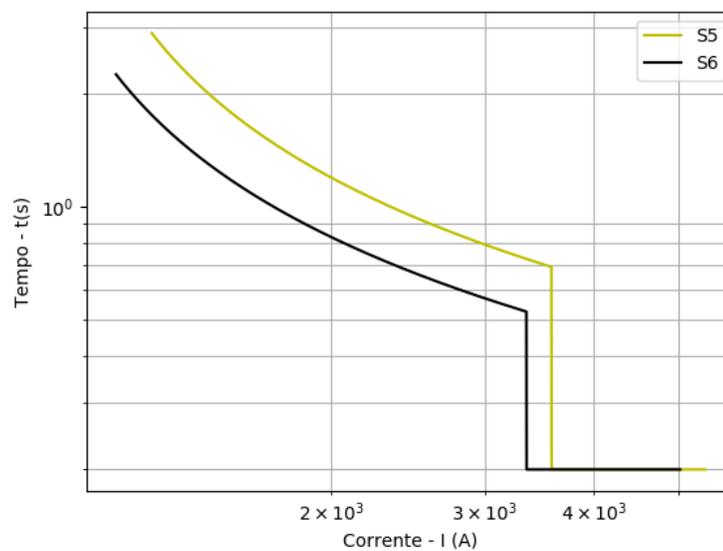
O ajustes de R6 se mantém como no item anterior. Já o grupo de ajustes do IED R5 é apresentado na Figura 29. Para análise da seletividade, as curvas de ambos foram plotadas na Figura 32.

Figura 31 – Ajustes do IED R5.



Fonte: O Autor.

Figura 32 – Curvas de tempo de atuação dos IEDs R5 e R6.



Fonte: O Autor.

Para esse par de dispositivos, a proteção é seletiva pois a curva de atuação do IED à

montante está acima da curva do IED à jusante e não há cruzamento das duas. Isso significa que para qualquer falta após o IED protetor, esse irá agir antes do dispositivo protegido.

4.4 Seletividade nos pares de dispositivos R1 a R6

Os grupos de ajustes dos IEDs R1 a R6 são mostrados nas Figuras 33, 34, 35, 36, 31 e 29. Para análise da seletividade, as curvas de fase e de neutro foram plotadas nas Figuras 37 e 38.

Figura 33 – Ajustes do IED R1.

Parâmetro	Fase	Neutro
Nome	S1	S1
Ipk50	5970.548755271895	Ipk50N: 5788.149657185666
Ipk51	1279.296201591412	Ipk51N: 97.82526791859976
Dial	0.2457673352474932	Dial(N): 0.7599722662736746
Curva	NI	Curva(N): NI

Fonte: O Autor.

Figura 34 – Ajustes do IED R2.

Parâmetro	Fase	Neutro
Nome	S2	S2
Ipk50	4981.686248818814	Ipk50N: 4390.699509599458
Ipk51	1125.6412979238687	Ipk51N: 93.90490171843354
Dial	0.22610976582611153	Dial(N): 0.6542711998308095
Curva	NI	Curva(N): NI

Fonte: O Autor.

Para esse grupo de dispositivos, a proteção é seletiva, pois a curva de atuação de cada IED está acima da curva dos IEDs à jusante e não há cruzamento entre elas. Isso significa

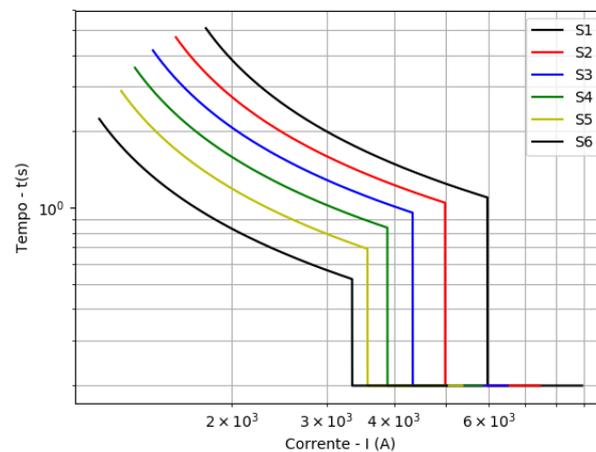
Figura 35 – Ajustes do IED R3.

Fonte: O Autor.

Figura 36 – Ajustes do IED R4.

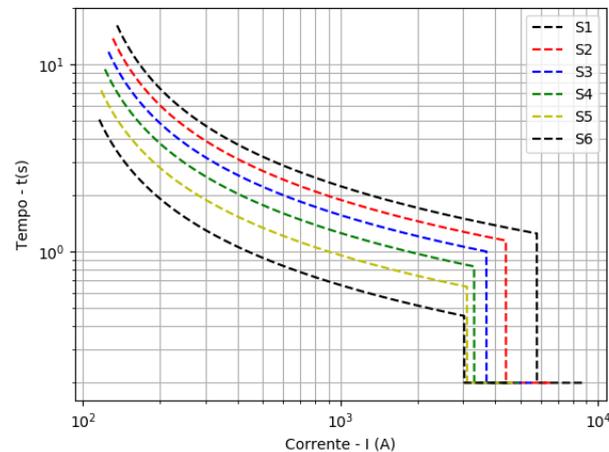
Fonte: O Autor.

Figura 37 – Curvas de tempo de atuação de fase dos IEDs R1, R2, R3, R4, R5 e R6.



Fonte: O Autor.

Figura 38 – Curvas de tempo de atuação de neutro dos IEDs R1, R2, R3, R4, R5 e R6.



Fonte: O Autor.

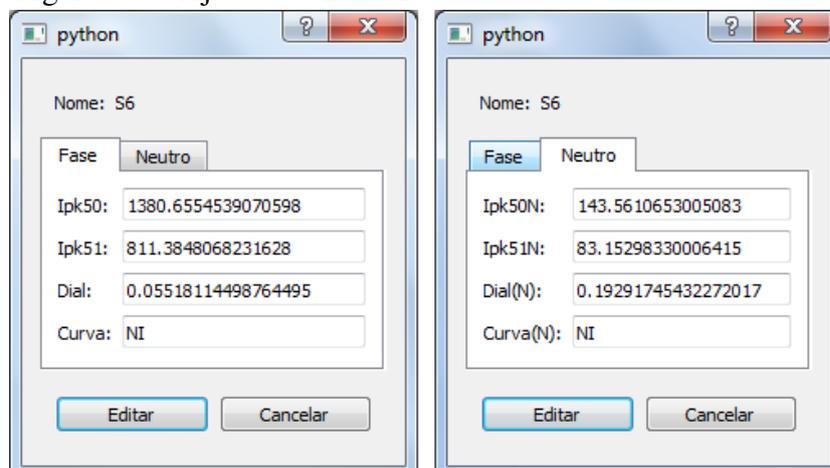
que para qualquer falta na rede, apenas o dispositivo imediatamente à montante atuará.

4.5 Coordenação R6 (protegido) – R7 (protetor)

Ao selecionar-se o botão de ajuste automático pela filosofia coordenada, só é possível verificar-se a coordenação entre R6 e R7, por ser o único par de dispositivos com IED protegido e chave-fusível protetora. Além disso, deve-se habilitar a função de religamento junto com uma lógica que desabilite a função de sobrecorrente instantânea antes do dispositivo religar.

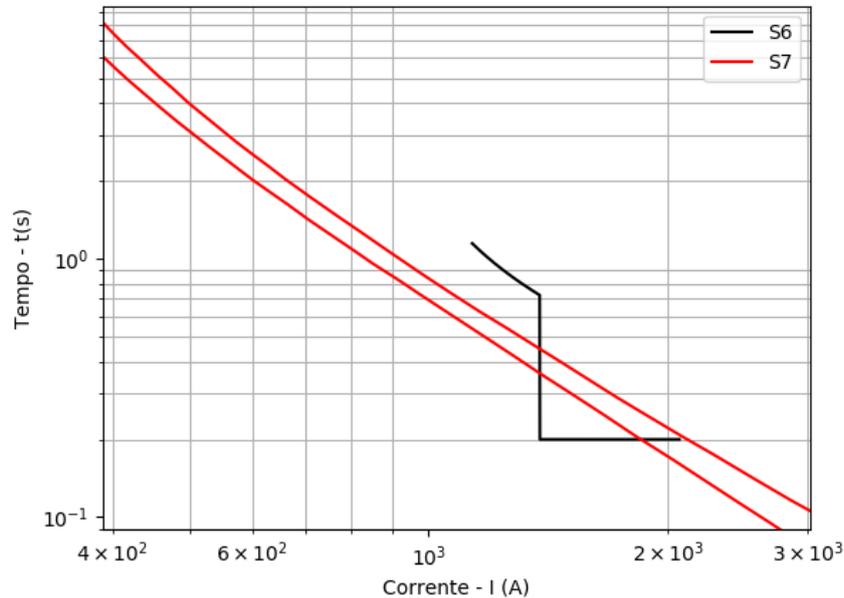
Verificou-se que o elo selecionado pelo ajuste automático na chave-fusível R7 se mantém como no item anterior. Já o grupo de ajustes do IED R6 foi alterado para os valores da Figura 39. Para análise de coordenação, as curvas de ambos foram plotadas na figura 39.

Figura 39 – Ajustes do IED R6.



Fonte: O Autor.

Figura 40 – Curvas de tempo máximo e mínimo *versus* corrente do IED e do elo R7 pela filosofia coordenada.



Fonte: O Autor.

Para todos os valores de corrente menores que a I_{pickup} da função instantânea, a curva do tempo máximo de fusão do elo-fusível está abaixo da curva do IED. Já para as correntes acima desse limite, a curva do tempo mínimo de fusão do elo-fusível permanece acima da curva do IED por um intervalo de 462A. Portanto, este par está coordenado até o momento em que as curvas se cruzam, em torno de 1840A.

4.6 Considerações gerais

Este capítulo permitiu confirmar a eficiência das funções de ajuste automático das proteções em redes radiais tanto pela filosofia seletiva, como pela filosofia coordenada.

Mesmo em casos como o dos pares iniciais, em que há uma certa proximidade entre as correntes de *pick up* das funções instantâneas dos relés, graças as características da rede, é possível executar a alterações manualmente.

É importante comentar que o tempo de execução da seletividade entre chaves-fusíveis pode ser reduzido. Atualmente o sistema realiza diversas buscas comparativas em um banco de dados que reúne os pares corrente e tempo de fusão de cada um dos elos-fusíveis comerciais modelados. Essa operação foi identificada como a que mais consome o tempo de processamento: cerca de 66% do tempo total da seleção automática de parâmetros pela filosofia seletiva e 67%

do tempo pela filosofia coordenada.

O repositório da biblioteca MyGrid.protect está disponível em (CAVALCANTE, 2019). Assim como o MyGrid, é *software* livre e licenciado sob os termos da licença MIT. Todos os interessados em contribuir e aprimorar o projeto são convidados a baixar, executar, avaliar e retornar com suas conclusões a respeito do *software*.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o MyGrid.protect, um *software* para estudos de coordenação e seletividade das proteções de uma rede de distribuição em média tensão.

O *software* foi escrito em Python, uma linguagem de programação aberta, e que utiliza recursos de outras bibliotecas de código aberto e armazena dados em tabelas *xlsx*. O programa está disponível em repositório on-line para acesso e contribuição segundo a licença MIT de desenvolvimento. Com isso, pode-se concluir que o MyGrid.protect foi escrito em sua maioria como um *software* livre, mas que ainda utiliza recursos de *softwares* pagos para armazenamento de dados.

A pesquisa e a implementação foram distribuídas ao longo dos Capítulos 2 e 3, onde se apresentam a definição das filosofias de proteção, a descrição e modelagem computacional dos IEDs, das chaves-fusíveis e das funções de ajuste automático e de plotagem de coordenogramas. Também foi apresentada toda a implementação da interface gráfica do programa.

Com o estudo de caso presente no capítulo 4 foi possível testar a utilização do *software* na RCAD, modelada anteriormente no MyGrid. A interface gráfica implementada permite a inserção de dispositivos em disposição radial sem recurso, a determinação manual dos seus parâmetros, a seleção do intervalo de coordenação entre dispositivos vizinhos, qual método de seleção automática dos parâmetros será implementada e quais dispositivos terão suas curvas plotadas no coordenograma. Mostrando-se intuitivo e com todos os recursos de fácil acesso.

A integração entre o *software* MyGrid e o MyGrid.protect também foi verificada nessa etapa. Utilizou-se a RCAD modelada em formato RNP para se calcular as correntes nominais e de curto no MyGrid. Essa mesma rede foi desenhada no MyGrid.protect e o programa foi capaz de associar as chaves da interface gráfica às da modelagem RNP pelo nome, ler suas correntes e assim realizar a seleção do grupo de ajustes de cada dispositivo.

O programa se mostrou eficiente ao plotar as curvas padronizadas pela IEC dos IEDs e as fornecidas pelos fabricantes de elos-fusíveis. Os métodos de auto-ajuste seletivo e coordenado foram capazes de selecionar os parâmetros de dispositivos com precisão, de modo a garantir o intervalo de tempo escolhido entre IEDs e o critério para seletividade entre chaves-fusíveis. Conclui-se que o programa permite os estudos de seletividade e coordenação entre os dispositivos pela análise dos seus coordenogramas.

Em linhas gerais, o que foi exposto neste trabalho mostra que o MyGrid.protect cumpre os objetivos traçados inicialmente além de ser uma ferramenta leve, com interface gráfica

simples e intuitiva que, como *software* independente, permite o ajuste manual das proteções de qualquer rede de distribuição. Já como módulo integrado ao MyGrid, permite o ajuste automático das proteções, agregando ainda mais funcionalidades ao programa.

5.1 Trabalhos Futuros

Considerando a capacidade do MyGrid de englobar GD nos seus cálculos e os demais avanços recentes em REI, as seguintes funcionalidades são desejáveis ao aprimoramento contínuo do MyGrid.protect:

- Redução do tempo de processamento da função de seleção do elo-fusível;
- Armazenamento dos dados das curvas de elos-fusíveis em uma estrutura nativa do Python;
- Inclusão de dados de outros fabricantes ao banco de dados de curvas de elos-fusíveis;
- Implementação das funções direcionais de sobrecorrente, 67 e 67N;
- Integração do MyGrid.protect a outros *softwares* de cálculo de curto-circuito e fluxo de carga;
- Implementação das funções de editar, salvar e abrir redes previamente modeladas no MyGrid.protect.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Prodist Mod. 8**: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional — prodist. módulo 8 — qualidade da energia elétrica. Brasília, 2015. v. 10, 28 p.
- ALBINI, J. F. Proteção do sistema de distribuição. 2003.
- ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. [S.l.]: IEEE Press Series on Power Engineering, 1998. v. 1999.
- ASPEN INC. **Advanced Systems for Power Engineering, ASPEN**. 2019. . Disponível em: <<https://www.aspeninc.com/web/about>>. Acesso em: 28 nov. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7099**: Relé de medição com uma grandeza de alimentação de entrada a tempo dependente especificado. Rio de Janeiro, 1981. 87 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7282**: Dispositivos fusíveis de alta tensão — dispositivos tipo expulsão — requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2011. 87 p.
- CAVALCANTE, F. W. O. J. **Repositório e documentação da biblioteca computacional MyGrid.protect**. 2019. Disponível em: <<https://github.com/watsoncavalcante/mygrid-protect>>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **ND 4.15**: Proteção de sobrecorrentes do sistema de distribuição de média tensão da cemig — norma de distribuição. Belo Horizonte, 2017. 77 p.
- COTOSCK, K. R. **Proteção de sistemas elétricos: uma abordagem técnico-pedagógica**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- CPFLENERGIA. **GED 2912**: Proteção de redes aéreas de distribuição — sobrecorrente. Campinas, 2016. 98 p.
- CYME INTERNATIONAL. **CYME Power Engineering Software**. 2018. . Disponível em: <<http://www.cyme.com/software/>>. Acesso em: 28 nov. 2019.
- DEHGHANPOUR, E.; KAZEMI, K. H.; KHEIROLLAHI, R.; SOLEYMANI, T. Optimal coordination of directional overcurrent relays in microgrids by using cuckoo-linear optimization algorithm and fault current limiter. p. 1365–1375, march. 2018.
- DNV GL. **Synergi Electric - Protection**. 2019. . Disponível em: <<https://www.dnvgl.com/services/power-distribution-system-and-electrical-simulation-software-synergi-electric-5005>>. Acesso em: 28 nov. 2019.
- ELETRÓBRÁS. **Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição**. Rio de Janeiro: Editora Campus Eletrobrás, 1982. v. 2.

ENEL DISTRIBUIÇÃO CEARÁ. **MAT 18-0277**: Chaves fusíveis tipo c — especificação técnica. Fortaleza, 2018. 28 p.

ESA. **EasyPower®Power Protector™**. 2019. Disponível em: <<https://www.easypower.com/products/easypower>>. Acesso em: 28 jun. 2019.

GE GRID SOLUTIONS. **Universal Relay Family**. 2019. Dados da família de relés universais da GE. Disponível em: <<https://www.gegridsolutions.com/multilin/>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

GIGUER, S. **Proteção de Sistemas de Distribuição**. Porto Alegre: Editora Sagra, 1988.

GREI. **Repositório e documentação da biblioteca computacional MyGrid**. 2019. . Disponível em: <<https://github.com/grei-ufc/MyGrid>>. Acesso em: 25 ago. 2019.

GRUPO EDP SO PAULO. **NTBD 3.01-0**: Proteção de redes de distribuição aérea primária. São Paulo, 1987. 48 p.

HUNTER, J.; DALE, D.; FIRING, E.; DROETTBOOM, M. **Matplotlib Documentation**. 2012. . Disponível em: <<https://matplotlib.org/#>>. Acesso em: 03 out. 2019.

JUREMA, L. M. C. **Modelagem e implementação de fluxo de carga trifásico e curto-circuito por componentes de fase em redes de distribuição com geração distribuída no aplicativo computacional MyGrid**. 2019. 107 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

LOSI, A.; RUSSO, M. Dispersed generation modeling for object-oriented distribution load flow. p. 1532–1540, abril. 2005.

MAMEDE, J. F.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. [S.l.]: LTC, 2011. v. 2012.

MARTINS, D. L. **Estudo de caso na Automação, Proteção e Supervisão de uma Subestação de Classe 69kV**. 2012. 93 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

NUMPY DEVELOPERS. **NumPy Documentation**. 2019. . Disponível em: <<https://numpy.org/>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

PEREIRA, D. R. **Um sistema de software para execução de estudos de coordenação e seletividade em sistemas de distribuição**. 2007. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

PYTHON, P. S. F. **Python**. 2019. Disponível em: <<https://www.python.org/psf-landing/>>. Acesso em: 10 out. 2019.

PYTHON, P. S. F. **Python bindings for the Qt cross-platform application and UI framework**. 2019. Disponível em: <<https://pypi.org/project/PySide2/>>. Acesso em: 30 out. 2019.

RODRIGUES, M. S. d. L. **Teste e validação das funções de proteção baseadas na IEC 61850 propostas para implantação no projeto piloro da rede de distribuição inteligente de Aquiraz**. 2015. 155 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

ROSSI, R. Proteção de sistemas industriais. FUPAI, 2005.

S&C ELECTRIC COMPANY. **Chave Fusível Tipo XS**. 2019. . Disponível em: <<https://www.sandc.com/pt/produtos-e-servicos/produtos/chave-fusivel-tipo-xs/>>. Acesso em: 12 ago. 2019.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Vamp 300 Series — Protection and Control managers for MV power systems**. 2018. Dados do relé VAMP 300 da Schneider. Disponível em: <<https://www.schneider-electric.com/en/product-range-download/62312-vamp-300-series/>>. Acesso em: 03 nov. 2019.

SCIPY DEVELOPERS. **SciPy.org, Scientific Computing Tools for Python**. 2019. . Disponível em: <<https://www.scipy.org/about.html>>. Acesso em: 30 ago. 2019.

THURNER, L.; SCHEIDLER, A.; SCHäFER, F.; MENKE, J. H.; DOLLICHON, J.; MEIER, F.; MEINECKE, S.; BRAUN, M. Pandapower - an open source python tool for convenient modeling, analysis and optimization of electric power systems. **IEEE Transactions on Power System**, IEEE, p. 09, 2017.