

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Braga Moura

COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA
INTEGRAÇÃO DO OPENDSS COM ALGORITMO
DESENVOLVIDO EM PYTHON

PORTO ALEGRE

2022

Guilherme Braga Moura

COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA
INTEGRAÇÃO DO OPENDSS COM ALGORITMO
DESENVOLVIDO EM PYTHON

**Projeto de diplomação submetido à
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como requisito necessário para
obtenção do grau de Engenheiro Eletri-
cista**

Porto Alegre, Maio de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

GUILHERME BRAGA MOURA

Esta Monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

Orientador(a): Prof. Dr. Maicon Jaderson
Silveira Ramos
Universidade Federal do Rio Grande do Sul -
UFRGS

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos
Universidade Federal do Rio Grande do Sul -
UFRGS

Dr. Eng. Lorenzo Comassetto
Rio Grande Energia - RGE

Porto Alegre, 11 de maio de 2022

Resumo

Este projeto de diplomação apresenta o desenvolvimento de uma solução computacional integrada ao programa de simulação para sistemas de distribuição de energia elétrica OpenDSS[®] que é capaz de propor uma solução viável de proteção a curtos-circuitos e sobrecorrente para sistemas elétricos de distribuição primários. Os sistemas elétricos estudados pelo algoritmo são construídos através do software OpenDSS[®] e os dados do mesmo são importados para estudo através da biblioteca py-dss-interface em Python. O projeto de proteção levou em conta a definição de elos-fusíveis, e dos ajustes de religadores e disjuntores, tendo em vista a coordenação e seletividade nas escolhas dos mesmos. Esta solução se baseou em métodos disponíveis na literatura e pesquisas que buscaram uma automatização deste processo. O código desenvolvido é capaz de propor a solução ao usuário, que obtém as respostas de dimensionamento, coordenação e, também, a não possibilidade de definição de elos-fusíveis, religadores e disjuntores em nós pré-determinados. Espera-se que o algoritmo aqui desenvolvido possa auxiliar os mais diversos serviços de engenharia no estudo de proteção de sistemas de distribuição, e que sirva de base a um projeto de maior magnitude que possa vir a ser desenvolvido de forma não integrada e competitiva com programas já existentes.

Palavras-chave: Sistemas de Distribuição, Proteção, Python, OpenDSS.

Abstract

This project presents the developing of a digital solution, integrated with the electric distribution system simulation tool OpenDSS[®], that is capable of proposing a viable solution to the short-circuit and overcurrent protection of electric distribution systems. The electric systems studied by the algorithm is built within the OpenDSS[®] software and the data are imported using the py-dss-interface library in Python. The protection project took into account the definition of fuse links, and the adjustments of reclosers and circuit breakers considering criterias of coordination and selectivity between them. This solution is based on methods available in the literature, as well as researchs that worked on an automation of this process. The developed code is capable of proposing a solution for the definition, coordination, and, even, the non-possibility of using fuse links, reclosers and circuit breakers. Is expected that the developed algorithm can be used to help in the protection study of electric distribution systems, and that it may be useful for a greater project that works in a non-integrated way and that can be competitive with already existing softwares.

Keywords: Distribution systems, Protection, Python, OpenDSS.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução do consumo de energia.	15
Figura 2 – Previsão de Carga 2021-2025.	15
Figura 3 – Configuração da rede de distribuição primária aérea radial.	18
Figura 4 – Curto-circuito trifásico.	19
Figura 5 – Curto-circuito bifásico.	20
Figura 6 – Curto-circuito bifásico-terra.	20
Figura 7 – Curto-circuito monofásico.	21
Figura 8 – Chave fusível.	24
Figura 9 – Exemplo de elo protegido e elos protetores	25
Figura 10 – Curvas características de elos-fusíveis do tipo K.	26
Figura 11 – Limites de coordenação entre elos fusíveis K preferenciais.	27
Figura 12 – Relé de função 50 e 51 microprocessado.	28
Figura 13 – Esquema de ligação de relés em um disjuntor.	28
Figura 14 – Religador de distribuição.	29
Figura 15 – Exemplo de operação de um religador.	30
Figura 16 – Exemplo de coordenação entre elo-fusível e religador.	31
Figura 17 – Disjuntor de média tensão.	32
Figura 18 – Religador U27 da Schenider Electric.	34
Figura 19 – Exemplo das curvas da norma IEC 60.255.	34
Figura 20 – Exemplo das curvas da norma ANSI c37.112.	35
Figura 21 – Rede de distribuição IEEE 34 nós.	40
Figura 22 – Rede de distribuição IEEE 123 nós.	41
Figura 23 – Rede do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.	42
Figura 24 – Sistema de 34 nós após primeiro experimento.	45
Figura 25 – Coordenograma do elo 818 com o religador.	45
Figura 26 – Coordenograma do elo 842 com o religador.	46
Figura 27 – Coordenograma do elo 862 com o religador.	46
Figura 28 – Coordenograma do religador com o disjuntor.	47
Figura 29 – Coordenograma do disjuntor.	47
Figura 30 – Rede do segundo experimento com o sistema de 34 nós.	48
Figura 31 – Sistema de 34 nós após segundo experimento.	50
Figura 32 – Coordenograma do elo 860 com o religador.	51
Figura 33 – Coordenograma do elo 846 com o religador.	51
Figura 34 – Coordenograma do elo 818 com o disjuntor.	52
Figura 35 – Coordenograma do religador com o disjuntor.	52
Figura 36 – Coordenograma do disjuntor.	53

Figura 37 – Rede do primeiro experimento com o sistema de 123 nós.	54
Figura 38 – Sistema de 123 nós após primeiro experimento.	56
Figura 39 – Coordenograma do elo 3 com o disjuntor.	56
Figura 40 – Coordenograma do elo 9 com o disjuntor.	57
Figura 41 – Coordenograma do elo 34 com o disjuntor.	57
Figura 42 – Coordenograma do elo 26 com o disjuntor.	58
Figura 43 – Coordenograma do elo 28 com o disjuntor.	58
Figura 44 – Coordenograma do elo 45 com o disjuntor.	59
Figura 45 – Coordenograma do elo 36 com o disjuntor.	59
Figura 46 – Coordenograma do elo 58 com o religador.	60
Figura 47 – Coordenograma do elo 55 com o religador.	60
Figura 48 – Coordenograma do elo 19 com o disjuntor.	61
Figura 49 – Coordenograma do elo 98 com o religador.	61
Figura 50 – Coordenograma do elo 102 com o religador.	62
Figura 51 – Coordenograma do elo 106 com o religador.	62
Figura 52 – Coordenograma do religador com o disjuntor.	63
Figura 53 – Coordenograma do disjuntor.	63
Figura 54 – Rede do segundo experimento com o sistema de 123 nós.	64
Figura 55 – Sistema de 123 nós após segundo experimento.	66
Figura 56 – Coordenograma do elo 36 com o religador.	66
Figura 57 – Coordenograma do elo 49 com o religador.	67
Figura 58 – Coordenograma do elo 28 com o religador.	67
Figura 59 – Coordenograma do elo 26 com o religador.	68
Figura 60 – Coordenograma do elo 98 com o religador.	68
Figura 61 – Coordenograma do elo 102 com o religador.	69
Figura 62 – Coordenograma do elo 106 com o religador.	69
Figura 63 – Coordenograma do religador 18 com o disjuntor.	70
Figura 64 – Coordenograma do religador 54 com o disjuntor.	70
Figura 65 – Coordenograma do disjuntor.	71
Figura 66 – Rede do terceiro experimento com o sistema de 123 nós.	72
Figura 67 – Sistema de 123 nós após terceiro experimento.	74
Figura 69 – Coordenograma do elo 9 com o disjuntor.	74
Figura 68 – Coordenograma do elo 3 com o disjuntor.	75
Figura 70 – Coordenograma do elo 34 com o disjuntor.	75
Figura 71 – Coordenograma do elo 19 com o disjuntor.	76
Figura 72 – Coordenograma do elo 26 com o disjuntor.	76
Figura 73 – Coordenograma do elo 28 com o disjuntor.	77
Figura 74 – Coordenograma do elo 45 com o disjuntor.	77
Figura 75 – Coordenograma do elo 36 com o disjuntor.	78

Figura 76 – Coordenograma do elo 58 com o religador.	78
Figura 77 – Coordenograma do elo 55 com o religador.	79
Figura 78 – Coordenograma do elo 60 com o religador.	79
Figura 79 – Coordenograma do elo 77 com o religador.	80
Figura 80 – Coordenograma do elo 73 com o religador.	80
Figura 81 – Coordenograma do elo 68 com o religador.	81
Figura 82 – Coordenograma do elo 98 com o religador.	81
Figura 83 – Coordenograma do elo 102 com o religador.	82
Figura 84 – Coordenograma do elo 106 com o religador.	82
Figura 85 – Coordenograma do elo 109 com o religador.	83
Figura 86 – Coordenograma do elo 81 com o elo 77.	83
Figura 87 – Coordenograma do religador com o disjuntor.	84
Figura 88 – Coordenograma do disjuntor.	84

Lista de tabelas

Tabela 1 – Origem das interrupções do sistema elétrico brasileiro	22
Tabela 2 – Características do Religador Utilizado	34
Tabela 3 – Exemplo de vetores das informações dos elos de proteção de rede.	36
Tabela 4 – Exemplo de vetores das localizações de religadores.	36
Tabela 5 – Exemplo de vetor da localização do disjuntor.	37
Tabela 6 – Exemplo de vetores das informações para dimensionamento dos elos de proteção de rede.	37
Tabela 7 – Exemplo de vetores dos elos-fusíveis definidos.	38
Tabela 8 – Resultados dos elos do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.	43
Tabela 9 – Resultados do religador do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.	44
Tabela 10 – Resultados do disjuntor do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.	44
Tabela 11 – Resultados dos elos do segundo experimento com o sistema de 34 nós. .	48
Tabela 12 – Resultados do religador do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.	50
Tabela 13 – Resultados do disjuntor do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.	50
Tabela 14 – Resultados dos elos do primeiro experimento com o sistema de 123 nós.	54
Tabela 15 – Resultados do religador do primeiro experimento com o sistema de 123 nós.	55
Tabela 16 – Resultados do disjuntor do primeiro experimento com o sistema de 123 nós.	55
Tabela 17 – Resultados dos elos do segundo experimento com o sistema de 123 nós.	65
Tabela 18 – Resultados dos religadores do segundo experimento com o sistema de 123 nós.	65
Tabela 19 – Resultados do disjuntor do segundo experimento com o sistema de 123 nós.	65
Tabela 20 – Resultados dos elos do terceiro experimento com o sistema de 123 nós.	72
Tabela 21 – Resultados do religador do terceiro experimento com o sistema de 123 nós.	73
Tabela 22 – Resultados do disjuntor do terceiro experimento com o sistema de 123 nós.	73

Lista de abreviaturas e siglas

<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>ANSI</i>	<i>American National Standards Institute</i>
<i>CC</i>	Curto-circuito
<i>CPFL</i>	Companhia Paulista de Força e Luz
<i>EI</i>	Extremamente Inverso
<i>EPE</i>	Empresa de Pesquisa Energética
<i>Icarga</i>	Corrente de carga
<i>Icc1</i>	Corrente de curto-circuito monofásico
<i>Icc2</i>	Corrente de curto-circuito bifásico
<i>Icc3</i>	Corrente de curto-circuito trifásico
<i>Icc1min</i>	Corrente mínima de curto-circuito monofásico
<i>Iccmax</i>	Corrente de curto-circuito máxima
<i>IccminF</i>	Corrente de curto-circuito mínima no final do trecho
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>Ipickup</i>	Corrente de partida
<i>Indef</i>	Indefinido
<i>LTI</i>	Inversa de Tempo Longo
<i>MI</i>	Muito Inversa
<i>NA</i>	Normalmente aberto
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>NF</i>	Normalmente fechado
<i>ONS</i>	Operador Nacional do Sistema Elétrico

<i>SE</i>	Subestação
<i>SI</i>	Inversa padrão
<i>SIN</i>	Sistema Interligado Nacional
<i>TD</i>	Tempo Definido
<i>VI</i>	Muito Inversa

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Sistema elétrico de distribuição	17
2.2	Curto-circuito	17
2.2.1	Curto-circuito Trifásico	18
2.2.2	Curto-circuito Bifásico	19
2.2.3	Curto-circuito Bifásico-terra	19
2.2.4	Curto-circuito Fase-terra	21
2.3	Proteção do sistema de distribuição primária	22
2.4	Elo-fusível	23
2.5	Relés de proteção de sobrecorrente	27
2.6	Religadores	27
2.7	Disjuntores	31
3	METODOLOGIA E DEFINIÇÕES	33
3.1	Definição dos modelos dos dispositivos de proteção	33
3.1.1	Elos-fusíveis	33
3.1.2	Religador	33
3.1.3	Disjuntor	35
3.2	Metodologia de solução	35
3.2.1	Processo de definição de informações	35
3.2.2	Processo de importação de dados	37
3.2.3	Dimensionamento dos elos-fusíveis	37
3.2.4	Coordenação entre elos-fusíveis	38
3.2.5	Coordenação entre elo-fusível e religador	38
3.2.6	Coordenação entre elo-fusível ou religador e disjuntor	39
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	40
4.1	Definição das redes elétricas	40
4.1.1	Sistema de 34 nós	42
4.1.1.1	Experimento 1	42
4.1.1.2	Experimento 2	48
4.1.2	Sistema de 123 nós	53
4.1.2.1	Experimento 1	53
4.1.2.2	Experimento 2	64

4.1.2.3	Experimento 3	71
5	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS	86
	ANEXOS	88
	ANEXO A – MACROFLUXO DO ALGORITMO.	90
	ANEXO B – FLUXOGRAMA DE DEFINIÇÃO DOS ELOS-FUSÍVEIS	91
	ANEXO C – FLUXOGRAMA DE SELETIVIDADE ENTRE ELOS. .	92
	ANEXO D – FLUXOGRAMA DE SELETIVIDADE DO RELIGADOR.	93
	ANEXO E – FLUXOGRAMA DE SELETIVIDADE DO DISJUNTOR.	94

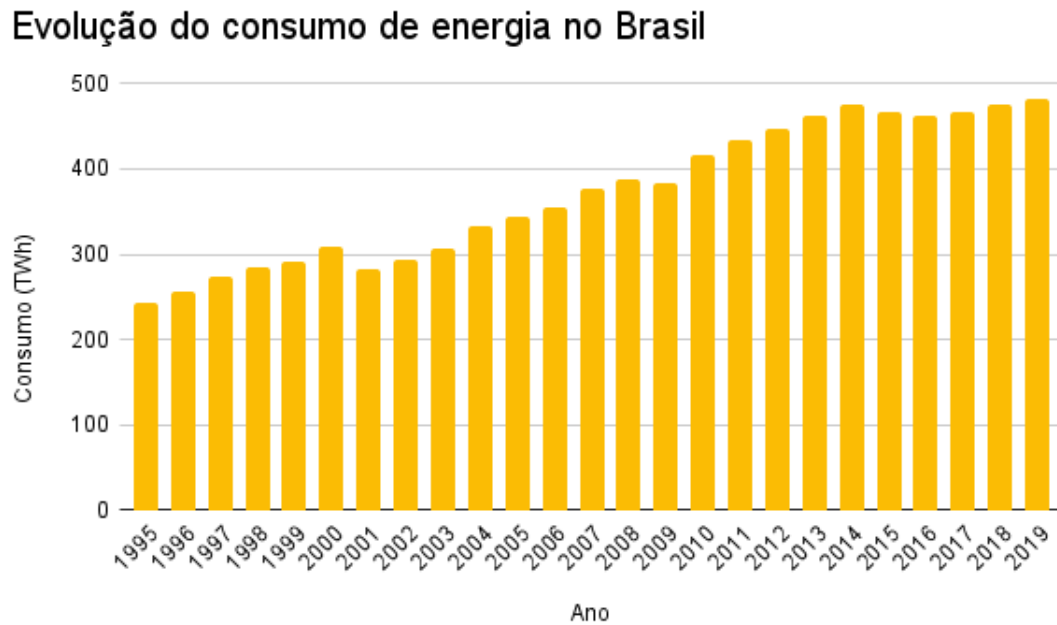
1 Introdução

No projeto de sistemas de distribuição de energia elétrica, uma boa parte da dedicação dos engenheiros é direcionada ao planejamento dos dispositivos de segurança que irão proteger esta rede de eventuais (e considerados) defeitos, realizando a análise e os ajustes necessários em diversos dispositivos de proteção dos alimentadores para se obter uma operação segura. Para isto, é realizado um minucioso estudo das correntes máximas que poderão ser atingidas no sistema, para então realizar a escolha dos dispositivos de proteção (como relés, disjuntores, religadores. . .), bem como sua melhor localização no sistema, de forma que, no caso de ocorrer uma operação fora dos limites do sistema, o dispositivo opere e desconecte de forma mais eficiente o ramo do sistema em que ocorreu a falha (MAMEDE, 2020).

Para a realização de estudos de engenharia, é usual que se utilizem softwares para visualização e simulação do objeto a ser estudado, de forma a auxiliar no projeto e obter uma resposta mais confiável ao problema em questão. Para estudos de proteção de sistemas de potência, envolvendo coordenação e seletividade dos dispositivos, não é diferente. Existem programas computacionais no mercado para auxiliar no projeto da proteção de um sistema elétrico, calculando dados do sistema, definindo parâmetros dos dispositivos, gerando diagramas e gráficos, entre outras funções (BRITO, 2012). Estes se tornam cada vez mais importantes conforme os sistemas elétricos são ampliados e tornam-se mais complexos, possibilitando mais eficiência e agilidade, principalmente quando se trata de redes de distribuições extensas, onde os estudos exigem muito tempo para serem realizados. Inclusive, recomenda-se que sejam feitas revisões no sistema a cada 5 anos, pelo menos, conforme submódulo 9.2 dos Procedimentos de Regulação Tarifária da ANEEL. O auxílio proporcionado por esses softwares se faz necessário com a constante demanda por ampliação dos sistemas elétricos do país, como demonstrado no histórico de consumo da Figura 1 e na previsão de carga da Figura 2. Isto faz com que tenham-se sistemas de transmissão e distribuição cada vez maiores e mais complexos.

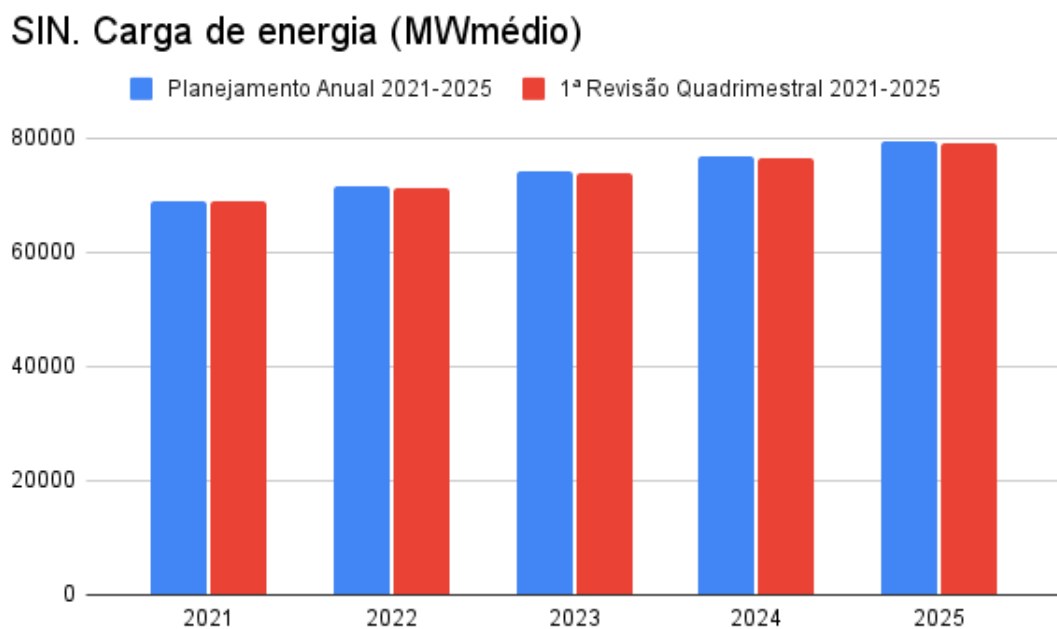
Este projeto teve como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo em Python que realize o dimensionamento de dispositivos dos dispositivos de proteção para uma rede de distribuição em média tensão, realizando estudos de coordenação e seletividade de dispositivos, integrando a sua utilização com dados de correntes de um sistema provenientes da ferramenta computacional OpenDSS[®] para o estudo de proteção de sistemas elétricos de potência. Com o desenvolvimento desse algoritmo pretendeu-se criar uma ferramenta acessível que consiga trazer agilidade e assertividade nos estudos de proteção de redes de distribuição de energia elétrica. Buscou-se, para isso, validar o método utilizando os sistemas de 34 e 123 nós do IEEE e avaliar a efetividade dos resultados obtidos.

Figura 1 – Evolução do consumo de energia.



Fonte: Adaptado de EPE, 2022.

Figura 2 – Previsão de Carga 2021-2025.



Fonte: Adaptado de ONS, 2021.

A escolha das ferramentas utilizadas baseia-se na ampla utilização tanto da linguagem Python quanto do programa OpenDSS[®]. Este possui uma gama de exemplos

que já podem ser utilizados para simulação e possui integração com a linguagem Python, através de uma biblioteca, que é uma linguagem de interpretação mais simples e com código aberto, o que fornece a oportunidade de explorar soluções já desenvolvidas por outros usuários.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Sistema elétrico de distribuição

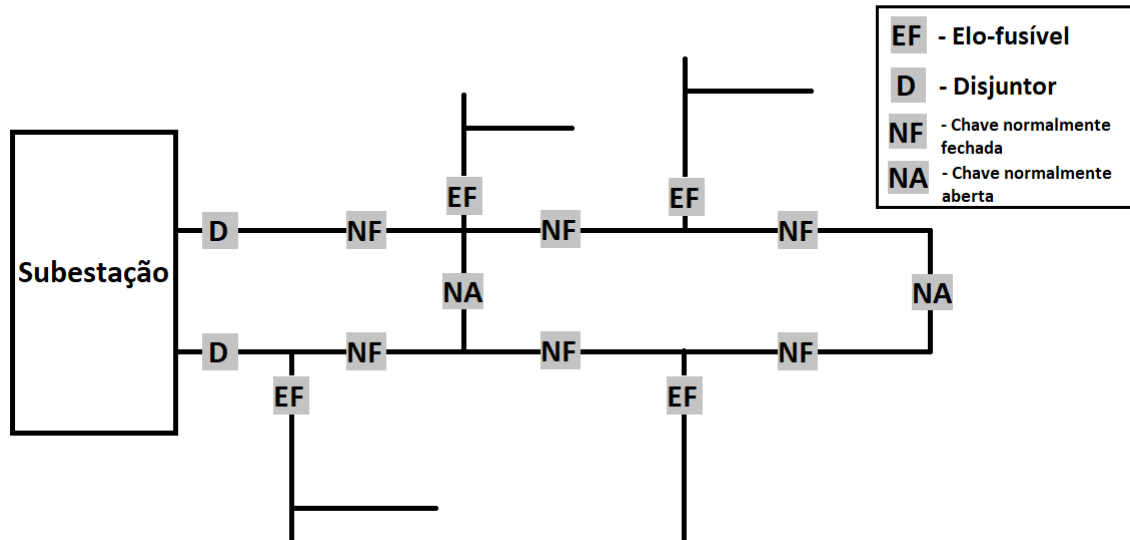
O sistema elétrico de distribuição é a parte do sistema elétrico de potência responsável por levar energia elétrica recebida do sistema de transmissão a todos os consumidores, sejam eles de grande, médio ou pequeno porte (Kagan, 2010). Esse sistema pode ainda ser dividido em três blocos: sistema de sub-transmissão, sistema de distribuição primária e sistema de distribuição secundária. O primeiro é responsável por receber a energia advinda do sistema de transmissão reduzida a uma tensão de 138 kV ou 69 kV e conduzi-la às subestações de distribuição e consumidores dessa tensão. O sistema de distribuição primária, sobre o qual este projeto é analisado, conduz a energia elétrica vinda da subestação de distribuição até os transformadores de distribuição e aos consumidores de média tensão. Após os transformadores de distribuição, a energia elétrica passa a ser distribuída pelo sistema de distribuição secundária com as tensões de 220/127 V ou 380/220 V até os consumidores de baixa tensão (KAGAN, 2010).

Os sistemas de distribuição no Brasil, são majoritariamente formados por uma rede aérea radial, contando com um ramo principal e ramais secundários que derivam do primeiro. Estes são normalmente protegidos por elos-fusíveis para separar o trecho no caso de curto-circuito causado por algum defeito na rede. Nesta configuração, também é usual que se utilize chaves seccionadoras normalmente fechadas para que seja possível a realização de manutenção no ramal e chaves seccionadoras normalmente abertas para possibilitar eventuais manobras que sejam necessárias (KAGAN, 2010). Esta configuração pode ser observada por meio de um diagrama unifilar na Figura 3.

2.2 Curto-circuito

Quando perturbações ocorrem no sistema elétrico de potência, acontecem alterações nas grandezas elétricas que podem causar danos às linhas e aos equipamentos conectados à rede elétrica. O curto-circuito é o acontecimento em que, por alguma interferência indesejada, há uma conexão elétrica entre as fases do sistema ou entre as fases e a terra. A corrente que percorre o sistema durante um curto-circuito é determinada pelas forças eletromotrizes internas das máquinas envolvidas por meio das impedâncias entre estas e o ponto de falta (STEVENSON JR, 1986). Durante um curto-circuito, devido às altas correntes percorrendo o sistema, as temperaturas são elevadas, há um aumento dos esforços mecânicos e podem ocorrer deformações dos materiais. Por estes motivos, é necessário que o sistema de proteção atue o mais rápido possível para isolar a falha e minimizar

Figura 3 – Configuração da rede de distribuição primária aérea radial.



Fonte: Adaptado de Kagan, 2010.

os danos materiais e o número de consumidores afetados (ZANETTA JUNIOR, 2006). Com o cálculo das correntes de curto-circuito, utiliza-se os valores obtidos no projeto e dimensionamento dos equipamentos de proteção de redes elétricas.

Segundo SATO (2014), em sistemas elétricos aterrados, os curtos-circuitos podem ser de quatro tipos: trifásico, bifásico, bifásico-terra e fase-terra.

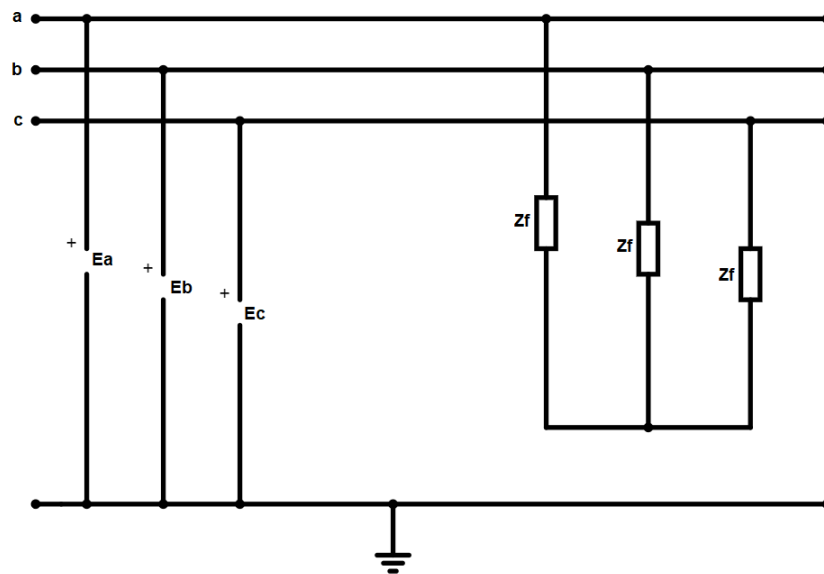
2.2.1 Curto-circuito Trifásico

Neste tipo de falta os três condutores apresentam correntes bem elevadas, alternadas e simétricas. Este é o tipo de falta que, geralmente, atinge o maior valor de corrente no sistema elétrico. A impedância de falta é idêntica para as três fases. A Figura 4 representa o sistema em um curto-circuito trifásico, onde são apresentados as impedâncias de falta. O resultado para a corrente de falta é apresentado na Equação 2.1.

$$I_{cc3} = \frac{E}{Z_1 + Z_f} \quad (2.1)$$

onde I_{cc3} é a corrente de curto-circuito trifásica, E é a tensão de linha do sistema antes da falta, Z_1 é a impedância equivalente de sequência positiva no local e Z_f é a impedância de falta no local.

Figura 4 – Curto-circuito trifásico.



Fonte: Adaptado de Anderson, 1995.

2.2.2 Curto-circuito Bifásico

Neste tipo de falta as correntes das duas fases em curto somadas devem ser nulas e a terceira deve ser nula (SATO, 2014). Este curto-circuito, então, oferece condições assimétricas. Esse tipo de falta, geralmente, possui grandezas menores que as da falta trifásica. A Figura 5 representa o sistema em um curto-circuito bifásico, onde são apresentados as impedâncias de falta. Nota-se que uma das correntes de fase será invertida nesta situação. O resultado para a corrente de falta é apresentado na Equação 2.2.

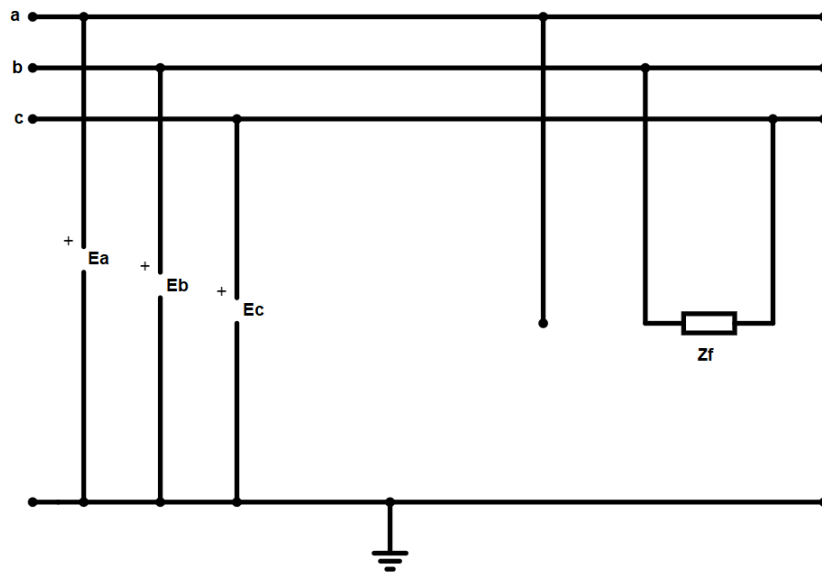
$$I_{cc2} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.2)$$

onde I_{cc2} é a corrente de curto-circuito bifásica, E é a tensão de sequência positiva, Z_1 é a impedância equivalente de sequência positiva no local, Z_2 é a impedância equivalente de sequência negativa e Z_f é a impedância de falta no local.

2.2.3 Curto-circuito Bifásico-terra

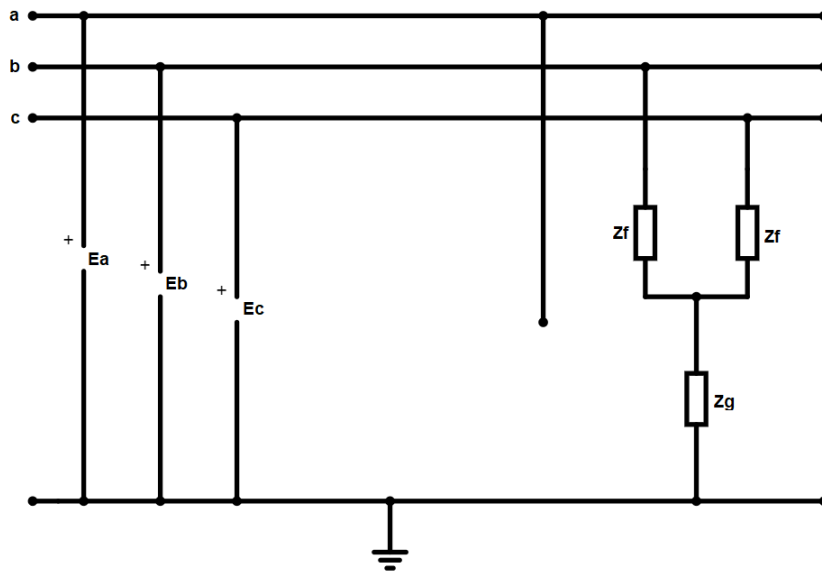
Da mesma forma que no curto-circuito bifásico, neste tipo de falta as correntes das duas fases em curto somadas devem ser nulas e a terceira deve ser nula. Este curto-circuito, então, oferece condições assimétricas. A Figura 6 representa o sistema sobre um curto-circuito bifásico-terra, onde são apresentados as impedâncias de falta. O resultado para a corrente de falta é apresentado na Equação 2.3.

Figura 5 – Curto-circuito bifásico.



Fonte: Adaptado de Anderson, 1995.

Figura 6 – Curto-circuito bifásico-terra.



Fonte: Adaptado de Anderson, 1995.

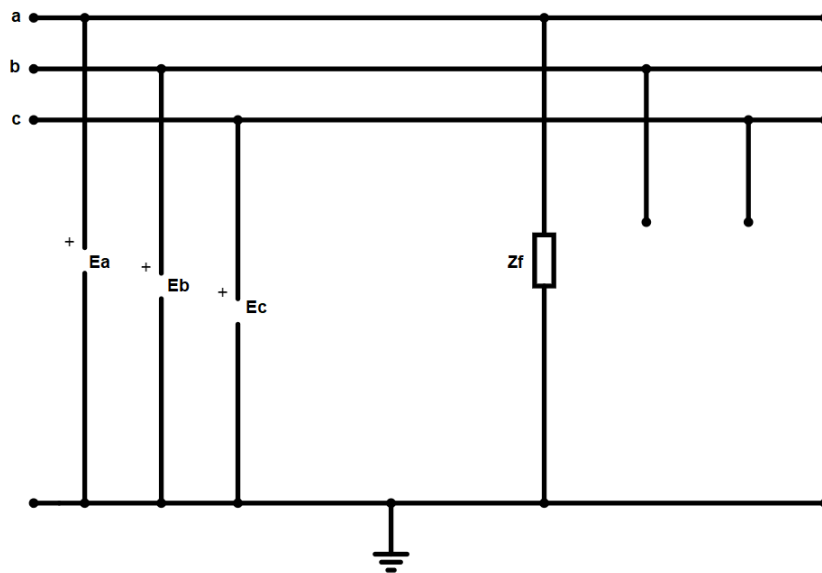
$$I_{cc2t} = \frac{E}{Z1 + Zf + \frac{(Z2+Zf)(Z0+Zf+3Zg)}{Z0+Z2+3Zg+2Zf}} \quad (2.3)$$

onde I_{cc2t} é a corrente de curto-circuito bifásico-terra, E é a tensão de sequência positiva, $Z1$ é a impedância equivalente de sequência positiva no local, $Z2$ é a impedância equivalente de sequência negativa, $Z0$ é a impedância equivalente de sequência zero, Zf é a impedância de falta no local e Zg é a impedância de terra.

2.2.4 Curto-circuito Fase-terra

Este é o tipo de falta mais frequente nos sistemas de potência. A Figura 7 representa o sistema em um curto-circuito monofásico, onde são apresentadas as impedâncias de falta. O resultado para a corrente de falta é apresentado na Equação 2.4.

Figura 7 – Curto-circuito monofásico.



Fonte: Adaptado de Anderson, 1995.

$$I_{cc1} = \frac{3E}{Z0 + Z1 + Z2 + 3Zf + 3Zn} \quad (2.4)$$

onde I_{cc1} é a corrente de curto-circuito monofásica, E é a tensão de sequência positiva, $Z1$ é a impedância equivalente de sequência positiva no local, $Z2$ é a impedância equivalente de sequência negativa, $Z0$ é a impedância equivalente de sequência zero, Zf é a impedância de falta no local.

2.3 Proteção do sistema de distribuição primária

Os indicadores de desempenho dos sistemas de distribuição no Brasil são regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, através da Resolução Normativa número 956 de 7 de Dezembro de 2021, que estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras. Nesta resolução, são definidos critérios que devem ser seguidos pelas concessionárias de energia no fornecimento de energia, entre eles, os índices de interrupção de fornecimento de energia, os quais sofrem grande influência da qualidade do projeto de proteção do sistema.

Os elos-fusíveis instalados nos ramais de derivação são responsáveis, juntamente com os relés de proteção e religadores, pela proteção do sistema como um todo. Todos estes equipamentos devem ser dimensionados para que o sistema desligue o menor número de clientes possível em caso de falhas em algum ponto do sistema, assim como facilitar a identificação do problema e a retomada do funcionamento da rede. A falha mais comum em qualquer sistema de potência é o curto-circuito, resultando em diversos distúrbios ao longo do sistema, o que pode ocasionar danos irreparáveis às instalações (MAMEDE, 2020).

Algumas informações podem ser úteis na fase de planejamento da segurança dos sistemas de energia elétrica, sempre tendo em mente que tais informações dependem da localização em que o projeto será aplicado. Essas informações devem ser acompanhadas e avaliadas pelas concessionárias de energia e os dados são utilizados conforme critérios da mesma. Na Tabela 1, pode-se observar a distribuição das falhas por origem da interrupção segundo Mamede (2011). Nota-se que a rede de distribuição é a segunda maior responsável pelas interrupções no fornecimento de energia no sistema elétrico brasileiro.

Tabela 1 – Origem das interrupções do sistema elétrico brasileiro

Origem	Ocorrência
Linha de Transmissão	68%
Rede de Distribuição	10%
Barramento da Subestação	7%
Transformador de Potência	6%
Gerador	1%
Próprio Sistema	4%
Consumidor	4%

MAMEDE, 2020

Para ter um bom desempenho, um projeto de proteção deve obedecer seis propriedades fundamentais: seletividade, zonas de atuação, velocidade, sensibilidade, confiabilidade e automação (MAMEDE, 2020).

- Seletividade: característica na qual apenas o dispositivo de proteção mais próximo

da falha deve atuar, isolando o defeito de modo que a menor parcela possível do sistema seja interrompida (MAMEDE, 2020).

- Zonas de atuação: propriedade pela qual o elemento de proteção é capaz de identificar se a ocorrência é dentro de sua zona protegida. Se for o caso, o elemento de proteção deve atuar e isolar a falha, caso contrário, não deve atuar (MAMEDE, 2020).
- Velocidade: rapidez de atuação do elemento de proteção, respeitando um tempo mínimo definido, a qual deve proporcionar o menor tempo possível de atuação para que reduza os danos causados ao sistema, evitar um tempo prolongado de subtensão e permitir a resincronização dos motores. (MAMEDE, 2020).
- Sensibilidade: trata-se da precisão com a qual o elemento de proteção identifica a sua faixa de operação. Esta propriedade pode ser mensurada conforme mostrado na Equação 2.5. O nível de sensibilidade adequada é entre 1,5 e 2,0 (MAMEDE, 2020).

$$Sens. = \frac{I_{ccmax}}{I_{ca}} \quad (2.5)$$

onde Sens. é a sensibilidade do dispositivo, I_{ccmax} é a corrente de curto-circuito máxima do ponto mais extremo da zona de proteção e I_{ca} é a corrente de acionamento do elemento.

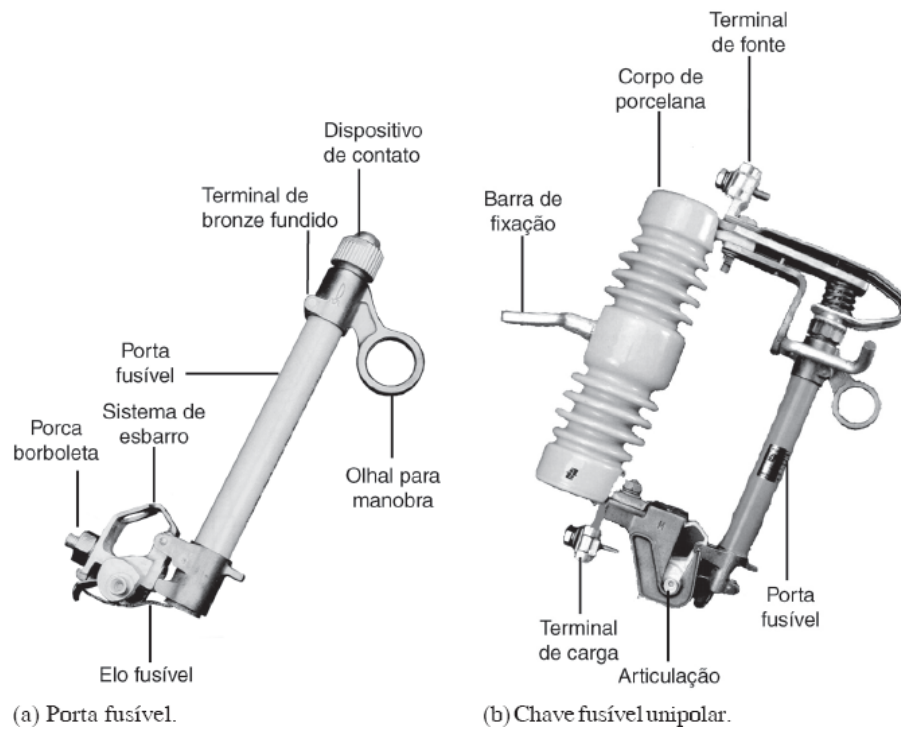
- Confiabilidade: característica do elemento cumprir com segurança e exatidão as funções definidas a ele (MAMEDE, 2020).
- Automação: o elemento de proteção deve atuar automaticamente quando for sensibilizado pelas características elétricas relacionadas a eles (MAMEDE, 2020).

2.4 Elo-fusível

O elo-fusível é um elemento de proteção para curto-circuito e sobrecarga, ele possui um elemento que entra em fusão com a passagem de uma corrente de alto valor, desta maneira ele deve interromper o circuito assim que o elemento é destruído sem que cause um arco elétrico (GERS, 2011). Um exemplo de chave-fusível com seus elementos pode ser vista na Figura 8.

O comportamento de um fusível é demonstrado pelas curvas de atuação que representam a relação de tempo de atuação pela corrente que passa pelo elemento. São três as curvas de atuação: tempo mínimo de fusão (corrente mínima que deve circular no fusível para dar início a fusão), tempo máximo de fusão (curva de tempo mínimo de fusão somada a margem de segurança do fabricante) e tempo total de extinção do arco (curva do tempo máximo de fusão somada ao tempo necessário para a extinção do arco elétrico) (LE MOS, 2020). Exemplos destas curvas podem ser observados na Figura 10.

Figura 8 – Chave fusível.



Fonte: Mamede, 2020.

Os elos-fusíveis são classificados em tipo H (alto surto), tipo K (rápidos) e tipo T (lentos) e nominados conforme suas correntes nominais. Os elos K e T admitem até 150% da sua corrente nominal como sobrecarga, sem que isso cause problemas térmicos. Desta maneira, a corrente nominal do elo-fusível de um ramal, como regra, deverá ser igual ou maior do que o fator K vezes o valor máximo da corrente de carga estimada no ponto considerado (LEMOS, 2020). Do mesmo jeito, a capacidade nominal do elo deverá ser no máximo um quarto da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no fim do trecho protegido por ele. Estas regras são representadas nas Equações 2.6 e 2.7.

$$K \times I_C \leq I_N \leq \frac{1}{4} \times I_{CC1min} \quad (2.6)$$

onde I_C é a corrente de carga, I_N é a corrente nominal do elo-fusível e I_{CC1min} é a corrente de curto-circuito fase-terra mínimo.

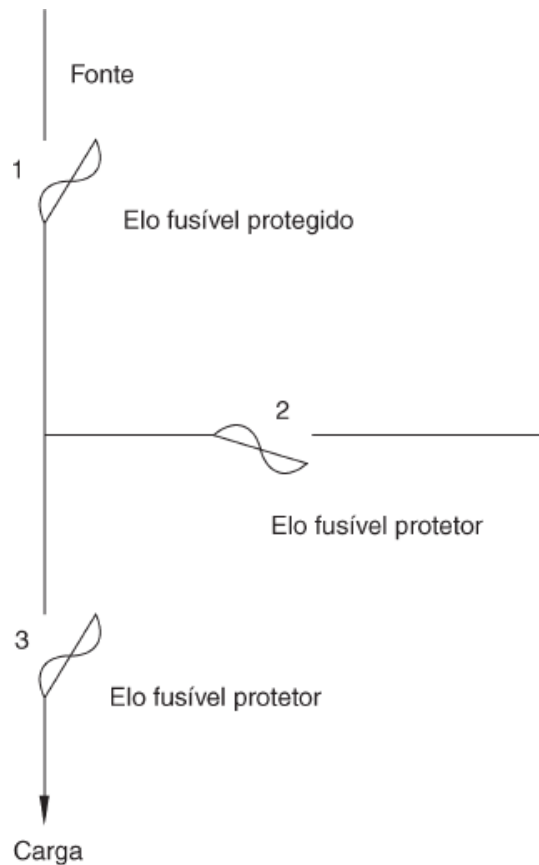
$$K = \left(1 + \frac{C\%}{100}\right)^n \quad (2.7)$$

onde $C\%$ é a taxa de crescimento anual da carga da região, n é o número de anos previsto até o próximo estudo e K é o fator de segurança.

Quando dois ou mais elos-fusíveis são usados no sistema, como no exemplo da Figura 9, o mais próximo da carga é chamado de elo protetor e o próximo, mais perto do

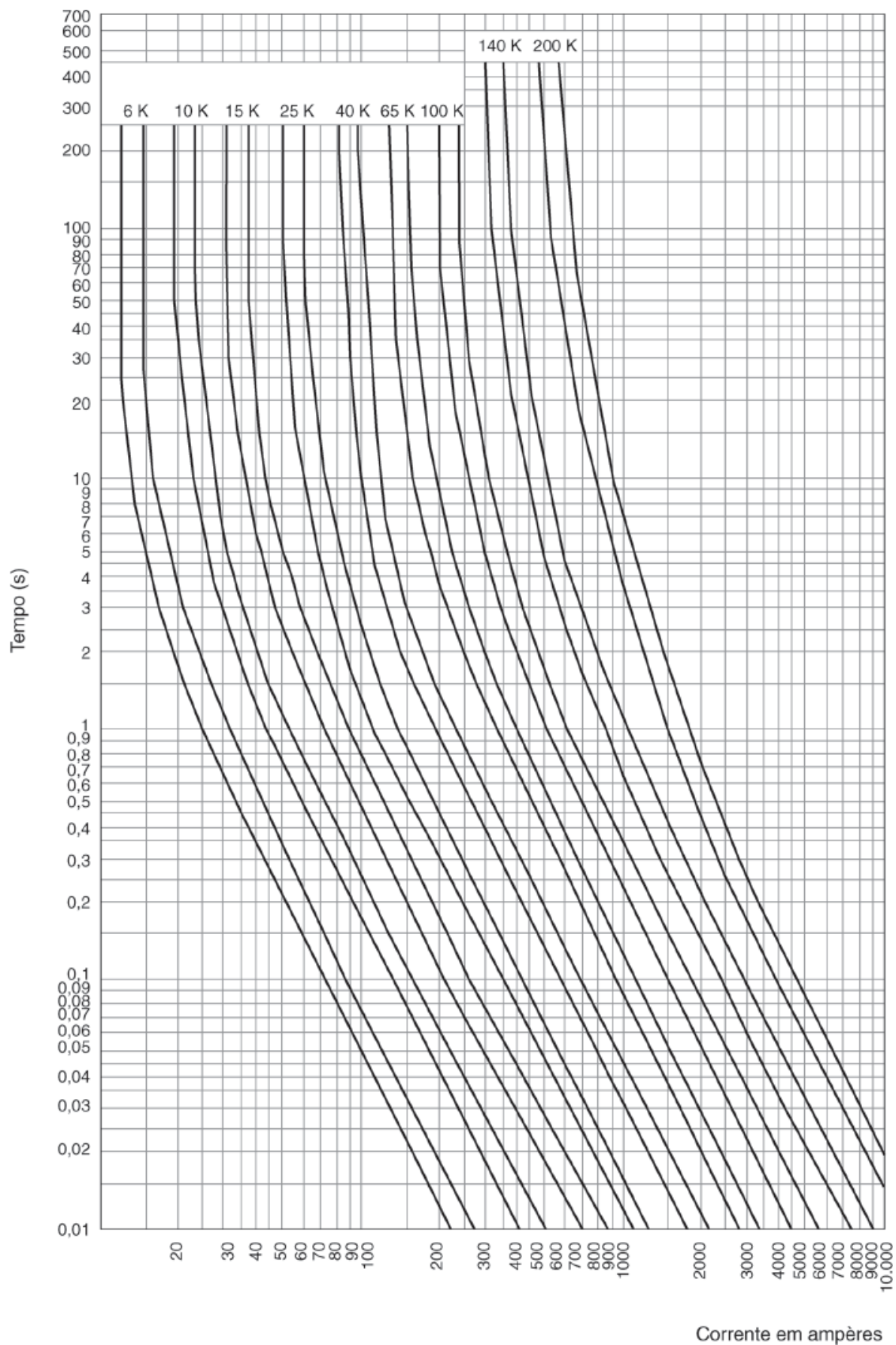
alimentador, é chamado de elo protegido, ou de retaguarda (GERS, 2011). Nestes casos, se faz necessária a coordenação entre os elos-fusíveis para que o elo protegido não atue se não for necessário, visto que muitas vezes ele secciona uma parte do sistema com maior número de consumidores (incluindo os atendidos pelo ramo do elo protetor). O critério essencial para a coordenação entre elos-fusíveis é que o tempo de extinção do arco do elo protetor não deve ultrapassar 75% do tempo mínimo de fusão do elo protegido (GERS, 2011). Esse critério dá origem a quadros de possíveis coordenações para uma referência mais rápida quando realizando projetos, como pode ser visto na Figura 11, para coordenação K-K, onde é mostrado qual elo-fusível consegue coordenar com qual outro elo até um limite de corrente de curto-circuito.

Figura 9 – Exemplo de elo protegido e elos protetores



Fonte: Mamede, 2020.

Figura 10 – Curvas características de elos-fusíveis do tipo K.



Fonte: Mamede, 2020.

Figura 11 – Limites de coordenação entre elos fusíveis K preferenciais.

		Elos-fusíveis Protegidos				
		K	15	25	40	65
Elos-fusíveis Protetores	6	510	840	1340	2200	
	10	300	840	1340	2200	
	15	-	430	1340	2200	
	25	-	-	660	2200	
	40	-	-	-	1100	

Fonte: Adaptado de Mamede, 2020.

2.5 Relés de proteção de sobrecorrente

Um relé pode ser fabricado para atuar somente na ocorrência de um determinado tipo de evento, respondendo a esse evento de uma única forma. Um exemplo é o relé de sobrecorrente instantâneo do tipo indução, constituído apenas de uma unidade instantânea (função 50). Nesse caso, diz-se que o relé é monofunção. Outros relés, no entanto, são fabricados para atuar na ocorrência de vários tipos de evento, respondendo a esses eventos de duas ou mais formas. Um exemplo é o relé de sobrecorrente, constituído de uma unidade instantânea (função 50) e uma unidade temporizada (função 51), incorporando uma unidade de subtensão e outra de sobretensão. Nesse caso, diz-se que o relé é multifunção. (MAMEDE, 2020)

No estudo de proteção de sistemas de distribuição, são amplamente empregados relés com as funções de sobrecorrente instantânea (função 50) e sobrecorrente temporizada (função 51). Esses relés são utilizados para acionar dispositivos como religadores e disjuntores. Apesar de se esperar a maior rapidez possível na atuação de um relé, os relés de função 51 são utilizados quando há a necessidade de seletividade entre os elementos de proteção, desse jeito é necessário permitir aos relés uma certa temporização antes que ordene a abertura do dispositivo de proteção associado (MAMEDE, 2020). Os relés de proteção de sobrecorrente podem se comportar seguindo diversas funções que dependerão de sua fabricação e configuração, usualmente, seguindo curvas normatizadas pela ANSI.

2.6 Religadores

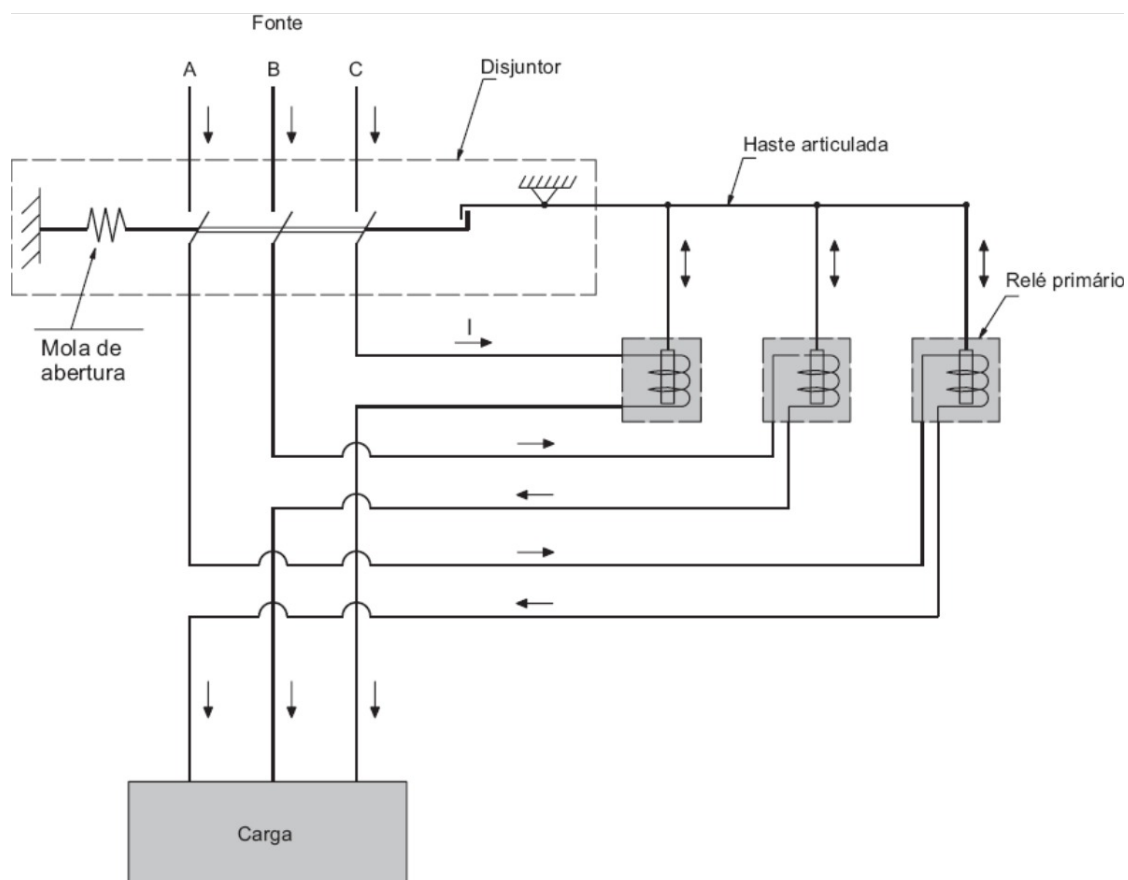
São normalmente utilizados em pontos predeterminados de circuitos longos, onde as correntes de curto-circuito não tem valor expressivo capaz de sensibilizar o equipamento

Figura 12 – Relé de função 50 e 51 microprocessado.



Fonte: Pextron.

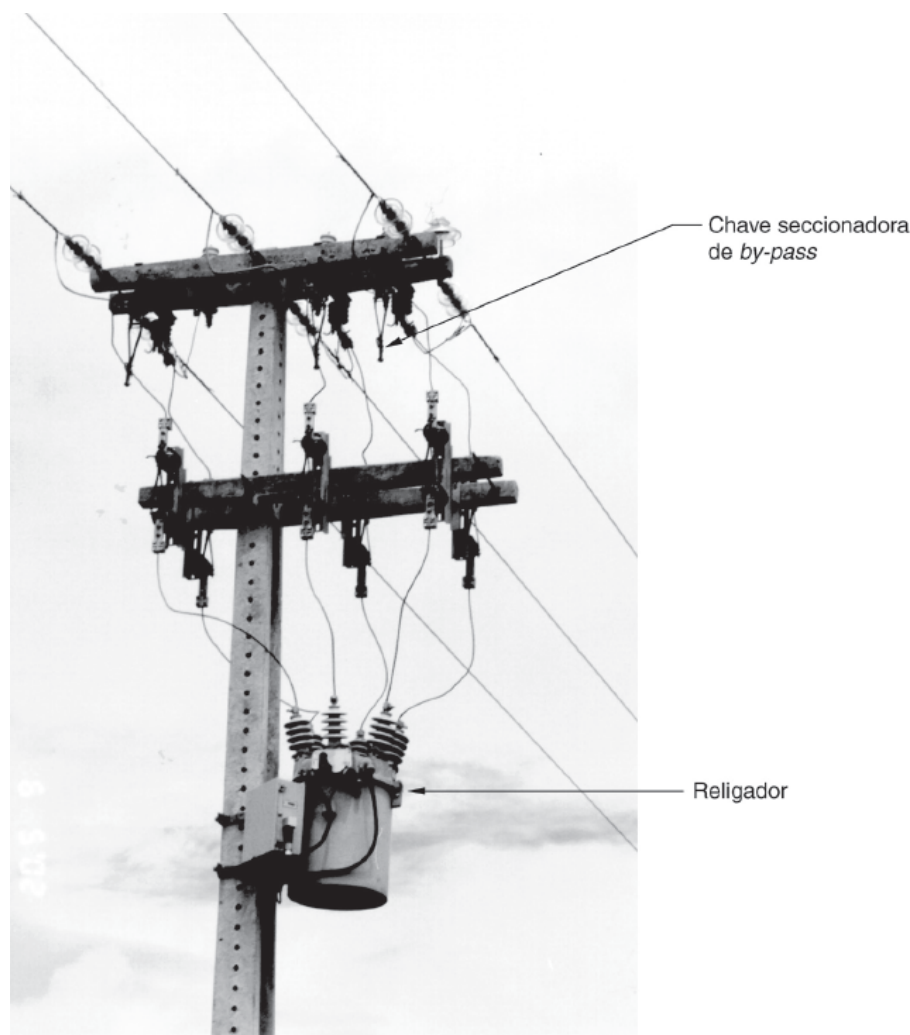
Figura 13 – Esquema de ligação de relés em um disjuntor.



Fonte: Mamede, 2020.

de proteção, instalado no início do alimentador; ou em ramais que suprem cargas relevantes em áreas com elevado risco de falhas temporárias (LEMOS, 2020). Este dispositivo baseia-se em interromper o circuito ao identificar a condição de sobrecorrente e religar-se automaticamente após um tempo determinado, caso o defeito persista, ele repete a sequência até um número determinado de vezes e então abre o circuito até a manutenção da rede ser realizada.

Figura 14 – Religador de distribuição.



Fonte: Mamede, 2020.

Religadores possuem curvas rápidas e curvas lentas de operação de forma a ser mais versátil ao engenheiro projetista. A melhor coordenação entre elos-fusíveis e religadores é obtida ajustando-se o religador para duas operações rápidas, seguidas de duas operações lentas (LEMOS, 2020). Com isto, tem-se duas regras para se obter a coordenação:

- Para todos os valores de falta possíveis, no trecho protegido pelo elo-fusível, o tempo mínimo de fusão do fusível deve ser maior que o tempo de abertura do religador na curva rápida multiplicado por um fator K.

- Para todos os valores de falta possível, no trecho protegido pelo elo fusível, o tempo total de interrupção do fusível deve ser menor que o tempo mínimo de abertura do religador na curva temporizada. Um exemplo de coordenação entre as curvas de um religador e um elo-fusível é mostrado na Figura 16.

Para ajustar os religadores, devem-se considerar os seguintes critérios (MAMEDE, 2020):

a) Ajuste da corrente de acionamento

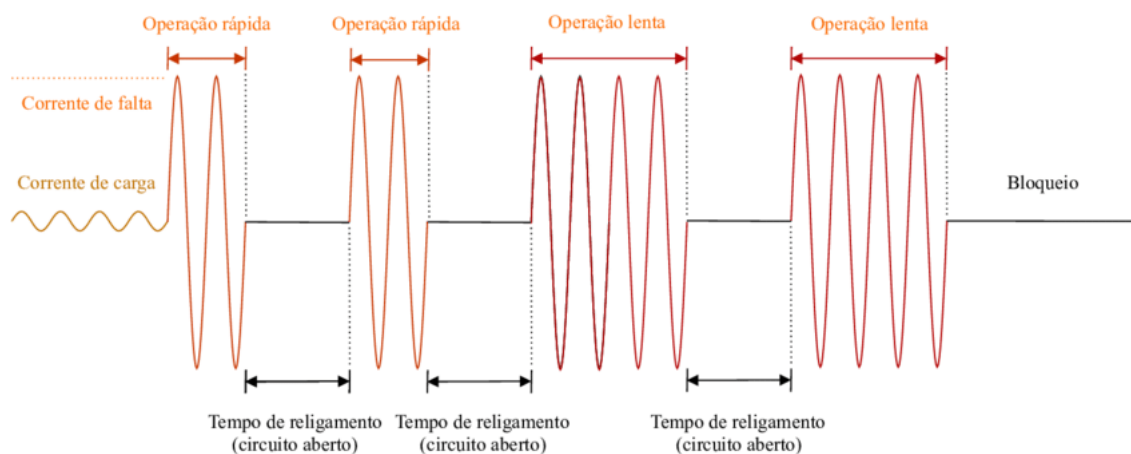
O ajuste da corrente de acionamento influencia em que valor de corrente o relé começa a atuar. Como os religadores, em geral, são dotados de unidades de proteção digitais para a proteção de fase e de terra, devem ser ajustados para as seguintes condições:

- Proteção de fase: unidades instantâneas ou de tempo definido (curvas rápidas) e unidades temporizadas (curvas rápidas e lentas).
- Proteção de neutro: unidades instantâneas ou de tempo definido (curvas rápidas) e unidades temporizadas (curvas rápidas e lentas).

b) Sequência de operação

Cabe a cada estudo específico definir o ciclo de religamento que permite a coordenação com os equipamentos de proteção instalados a jusante do religador. Um exemplo pode ser visto na Figura 15

Figura 15 – Exemplo de operação de um religador.



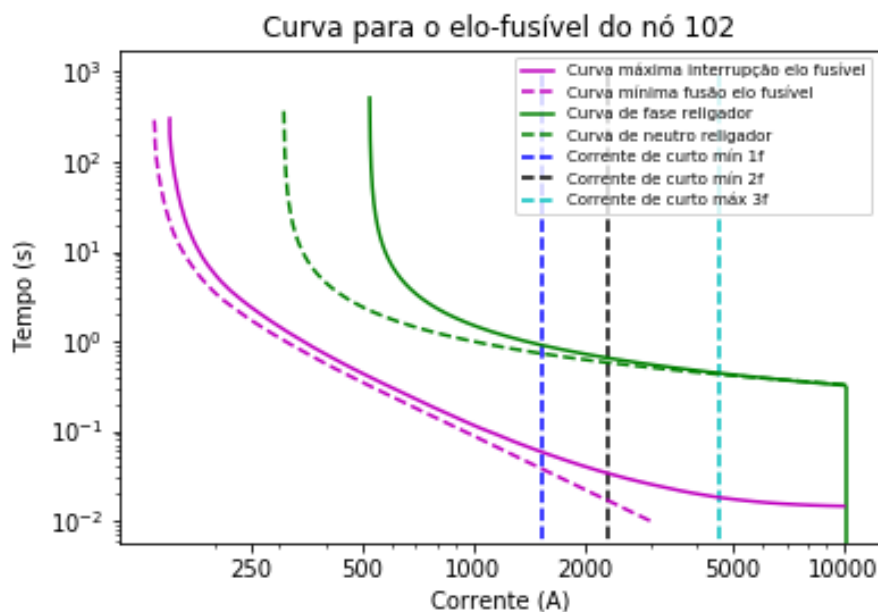
Fonte: VARGAS, 2020.

c) Tempo de religamento

Da mesma forma anterior, cabe também a cada estudo específico definir o tempo de religamento que permita uma coordenação seletiva entre os equipamentos de proteção instalados a jusante e a montante do religador.

Deve-se ajustar o tempo de religamento de forma a permitir que o relé de sobrecorrente retorne a sua posição de repouso antes de uma nova ordem de religamento. Essa condição é particularmente importante para relés eletromecânicos de indução, devido à inércia do disco de retornar à sua posição de repouso após percorrer um determinado valor do seu arco.

Figura 16 – Exemplo de coordenação entre elo-fusível e religador.



Fonte: O Autor, 2022.

2.7 Disjuntores

Disjuntores são utilizados associados a relés de proteção de sobrecorrente principalmente na saída dos alimentadores da subestação de distribuição (LEMOS, 2020). Para atender aos critérios de proteção, o disjuntor deve satisfazer no mínimo aos seguintes requisitos:

- A tensão nominal do disjuntor deve ser igual ou superior à tensão nominal do sistema. Quando a tensão do disjuntor for superior, deve-se considerar a capacidade de interrupção do disjuntor em função do valor da tensão nominal do sistema.
- A capacidade nominal do disjuntor deve ser superior à máxima corrente que possa fluir pelo disjuntor, obtida a partir do planejamento de longo prazo.
- A capacidade de interrupção do disjuntor deve ser igual ou superior à corrente de curto-circuito trifásico ou fase-terra, a que for maior, no ponto de instalação do disjuntor, ou seja, o barramento da subestação.

- O nível de isolamento do disjuntor deve ser compatível com o nível de isolamento do sistema.

Para que exista coordenação entre o disjuntor e os elos-fusíveis devem se seguir certos critérios (LEMOS, 2020):

- A unidade de sobrecorrente de fase deve ser ajustada para atuar para a menor corrente do trecho protegido pelo disjuntor;
- A curva da unidade de sobrecorrente de fase e de neutro não deve cortar e nem estar abaixo da curva do elo fusível em todo o trecho protegido pelo disjuntor;
- O afastamento entre a curva da unidade de sobrecorrente de fase e de neutro e a curva do elo fusível deve ser de no mínimo 0,20 segundos para garantir que o elo fusível deve atuar antes da função 51 de fase para curtos-circuitos bifásicos e trifásicos e antes da função 51 de neutro para curto-circuito fase-terra.

Figura 17 – Disjuntor de média tensão.



Fonte: WEG.

3 Metodologia e definições

3.1 Definição dos modelos dos dispositivos de proteção

Para a escolha dos dispositivos de proteção a serem utilizados no projeto foram levados em conta, principalmente, as escolhas e definições usuais de distribuidoras de energia do Brasil, sem deixar de respeitar os limites impostos pelos estudos de proteção. Para definições de curvas características e tolerâncias de dispositivos foram utilizados dados de fabricantes que estão disponíveis publicamente.

3.1.1 Elos-fusíveis

Os dispositivos elos-fusíveis a serem utilizados no projeto foram definidos baseando-se na utilização usual pelas concessionárias de energia elétrica no Brasil. De acordo com a norma técnica da Companhia Paulista de Força e Luz, GED-2912: "Os elos fusíveis empregados nas chaves fusíveis das redes de distribuição são do tipo K. As capacidades nominais usadas pela CPFL são 6A, 10A, 15A, 25A, 40A e 65A, todos do grupo A da NBR 7282." Desta forma, foram definidos os elos-fusíveis chamados de preferenciais, que contém os definidos na norma técnica descrita.

3.1.2 Religador

Os religadores possuem características de operação a tempo dependente e tempo definido para fase e terra, sendo que os equipamentos mais modernos incluem também uma unidade sensível de terra, com curvas independentes da unidade normal de terra (CPFL, 2016). Os religadores definidos para este projeto possuem relés digitais de sobrecorrente de fase (50/51) e neutro (50N/51N), com as escolhas de curvas definidas pelas normas IEC 60.255 e ANSI c37.112. Um exemplo de tais curvas pode ser observado nas Figuras 19 e 20, onde estão construídas as curvas características para os valores de corrente de partida de 180A para o relé de função 51. Tendo como base os religadores da série U27 da Schneider Electric, as características consideradas para os religadores utilizados no projeto podem ser vistos na Tabela 2. Para este projeto, utilizou-se apenas a curva de ação lenta do religador.

Figura 18 – Religador U27 da Schenider Electric.



Fonte: Schneider Electric.

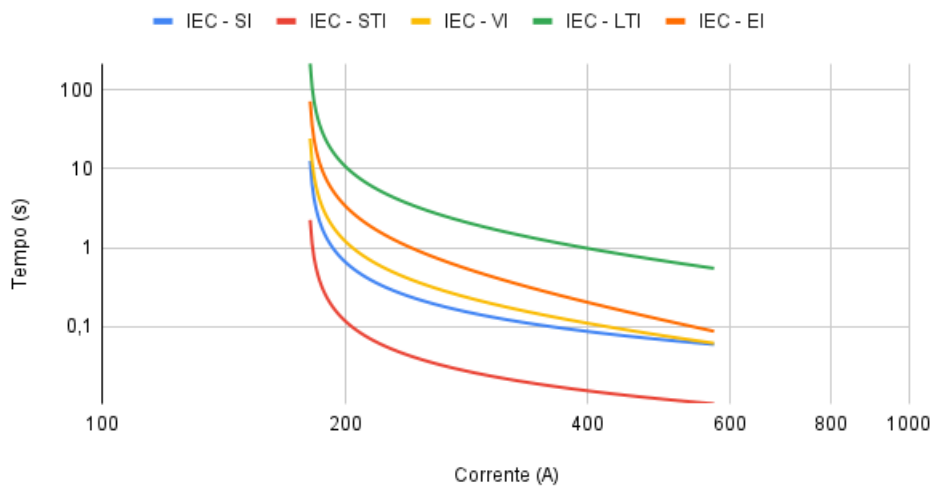
Tabela 2 – Características do Religador Utilizado

Característica	Valor
Máxima tensão nominal	27kV
Corrente contínua nominal	630A
Frequência nominal	50/60 Hz
Corrente de interrupção simétrica nominal	12.5kV

Adaptado de Schneider Electric, 2017

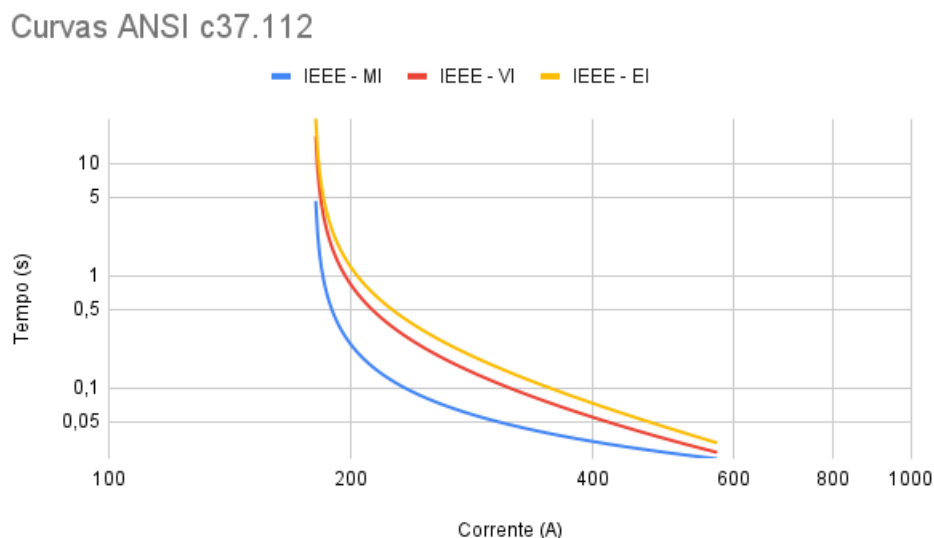
Figura 19 – Exemplo das curvas da norma IEC 60.255.

Curvas IEC 60.255



Fonte: Adaptado de IEC 60.255.

Figura 20 – Exemplo das curvas da norma ANSI c37.112.



Fonte: Adaptado de ANSI c37.112.

3.1.3 Disjuntor

O equipamento de proteção que foi utilizado na saída dos alimentadores estudados é o disjuntor comandado por relés de sobrecorrente de fase (50/51) e neutro (50N/51N). Da mesma forma que o religador, as escolhas das curvas de operação são definidas pelas normas IEC 60.255 e ANSI c37.112.

3.2 Metodologia de solução

Primeiramente, a partir de uma rede de distribuição modelada no *software* OpenDSS, são definidas as localizações dos dispositivos de proteção a serem estipulados na rede. Pensando na proteção do ramo principal e na segmentação dos ramos derivados. Assim que definidos os locais, os nomes dos nós de referência devem ser passados ao programa, pois, a partir das informações destes nós, serão obtidos os dados para a estimação. O macrofluxo do algoritmo pode ser observado no Anexo A.

3.2.1 Processo de definição de informações

Para que o programa desenvolvido consiga dimensionar os dispositivos de proteção, alguns dados devem ser fornecidos manualmente. Para informações de elos-fusíveis de proteção da rede:

- o nome do nó logo em frente (a diante) de cada elo-fusível de proteção de rede;

- o nome do nó referente ao final do trecho protegido por cada elo-fusível de proteção de rede;
- o nome do nó do elo-fusível protegido que deve fazer coordenação com cada elo-fusível indicado;
- o nome do nó do religador que deve fazer coordenação com cada elo-fusível indicado;
- o nome do nó do disjuntor que deve fazer coordenação com cada elo-fusível indicado.

As informações devem ser fornecidos em cinco vetores respeitando o mesmo índice para os mesmos dispositivos, conforme mostrado na Tabela 3. Para os casos de não haver elos protegidos ou religadores para coordenação com o elo do índice especificado, é indicado apenas com um traço: '-'.¹

Tabela 3 – Exemplo de vetores das informações dos elos de proteção de rede.

Índ	Vetor 1	Vetor 2	Vetor 3	Vetor 4	Vetor 5
0	Nó do Elo 0	Nó final Elo 0	Nó Elo proteg 0	Nó Religador 0	Nó Disj 0
1	Nó do Elo 1	Nó final Elo 1	Nó Elo proteg 1	Nó Religador 1	Nó Disj 1
2	Nó do Elo 2	Nó final Elo 2	Nó Elo proteg 2	Nó Religador 2	Nó Disj 2
3	Nó do Elo 3	Nó final Elo 3	Nó Elo proteg 3	Nó Religador 3	Nó Disj 3
...
n	Nó do Elo n	Nó final Elo n	Nó Elo proteg n	Nó Religador n	Nó Disj n

O Autor, 2021

Por fim, deve ser fornecido o nome dos nós onde estão colocados os religadores e o disjuntor, conforme Tabela 4 e Tabela 5. Bem como devem ser indicados quais disjuntores são protegidos pelos religadores referenciados.

Tabela 4 – Exemplo de vetores das localizações de religadores.

Índice	Vetor 1	Vetor 2
0	Nome do nó do Religador 0	Nó do Disjuntor Protegido pelo Religador 0
1	Nome do nó do Religador 1	Nó do Disjuntor Protegido pelo Religador 1
2	Nome do nó do Religador 2	Nó do Disjuntor Protegido pelo Religador 2
3	Nome do nó do Religador 3	Nó do Disjuntor Protegido pelo Religador 3
...
n	Nome do nó do Religador n	Nó do Disjuntor Protegido pelo Religador n

O Autor, 2021

Após a definição destes dados, deve ser definido os valores referentes ao cálculo do fator de segurança: a taxa de aumento de carga anual da região e o número de anos previsto até o próximo estudo (o horizonte). Estes dados são fornecidos na forma de variáveis *float*.

Tabela 5 – Exemplo de vetor da localização do disjuntor.

Índice	Vetor 1
0	Nome do nó do Disjuntor

O Autor, 2021

3.2.2 Processo de importação de dados

Após todos as informações necessárias estarem definidas, o programa, através da biblioteca de Python *py-dss-interface* compila o sistema modelado no arquivo do programa OpenDSS[®] de interesse e importa os dados necessários para uso no estudo de coordenação e seletividade. São estes: os nomes de todas as linhas, os nomes de todos os nós, o número total de nós, a tensão secundária do transformador da subestação, as correntes de carga e as correntes de curtos-circuitos. A corrente de carga é importada diretamente do[®] a partir dos nomes das linhas selecionadas, as correntes de curto-circuito são definidas a partir dos dados importados de impedâncias do sistema. a corrente de curto-circuito trifásico, bifásico e monofásico a partir dos cálculos das Equações 2.4, 2.2 e 2.1 utilizando as informações de impedância nos locais fornecidos no Vetor 2 da Tabela 3. Todos estes dados são salvos de forma a seguir os mesmo índices da Tabela 3.

O conjunto destas informações em vetores é representado na Tabela 6.

Tabela 6 – Exemplo de vetores das informações para dimensionamento dos elos de proteção de rede.

Índice	Vetor 1	Vetor 2	Vetor 3	Vetor 4
0	I de carga Elo 0	I de CC3 Elo 0	I de CC2 Elo 0	I de CC1 Elo 0
1	I de carga Elo 1	I de CC3 Elo 1	I de CC2 Elo 1	I de CC1 Elo 1
2	I de carga Elo 2	I de CC3 Elo 2	I de CC2 Elo 2	I de CC1 Elo 2
3	I de carga Elo 3	I de CC3 Elo 3	I de CC2 Elo 3	I de CC1 Elo 3
...
n	I de carga Elo n	I de CC3 Elo n	I de CC2 Elo n	I de CC1 Elo n

O Autor, 2021

3.2.3 Dimensionamento dos elos-fusíveis

Com todas as informações necessárias definidas, os elos-fusíveis são dimensionados conforme a regra definida na Equação 2.6. Quando os limites são amplos o suficiente para que mais de um elo-fusível possa ser empregado, mantém-se o elo-fusível de menor valor. Para casos em que não há elo-fusível possível dentro dos limites calculados, o programa sugere a utilização de uma chave desligadora. Este algoritmo pode ser observado no Anexo B. Desta forma, os elos-fusíveis definidos são salvos de forma a respeitar os mesmos índices estabelecidos nas Tabelas 3 e 6. Isto é representado na Tabela 7.

Tabela 7 – Exemplo de vetores dos elos-fusíveis definidos.

Índice	Vetor 1
0	Elo-fusível definido para o Elo 0
1	Elo-fusível definido para o Elo 1
2	Elo-fusível definido para o Elo 2
3	Elo-fusível definido para o Elo 3
...	...
n	Elo-fusível definido para o Elo n

O Autor, 2021

3.2.4 Coordenação entre elos-fusíveis

Para o processo de coordenação e seletividade entre os elos-fusíveis protetores e protegidos é utilizada a tabela da Figuras 11. Com as informações das tabelas dentro do programa e os dados de curto-circuito trifásico importados anteriormente, é verificado se os elos dimensionados na etapa anterior são adequados para coordenar com os seus respectivos elos protetores. Esta etapa utiliza as informações fornecidas manualmente no Vetor 3 da Tabela 3. Nesta etapa, o programa identifica qual seria o elo-fusível protegido adequado para que haja a coordenação e seletividade entre este o elo protetor baseado na informação do valor de corrente de curto-circuito trifásico no local do elo protetor. Caso o programa dimensione um elo-fusível de menor valor que o já dimensionado anteriormente, mantém-se o elo já dimensionado. Caso o programa calcule um elo-fusível de maior valor que o já dimensionado, este é substituído pelo calculado para que se respeite as características necessárias de coordenação e seletividade. Este algoritmo pode ser observado no Anexo C.

3.2.5 Coordenação entre elo-fusível e religador

Nesta etapa, utilizam-se os valores de elos-fusíveis dimensionados até então para realizar o ajuste da curva de proteção dos religadores. Para cada religador declarado e para cada elo-fusível relacionado a ele, realiza-se um teste para verificar se em todo o ponto, entre a corrente de curto-circuito bifásica e a corrente de curto-circuito trifásica, a curva característica de fase do religador está afastado no tempo da curva característica do elo-fusível por um fator de segurança definido previamente pelo usuário, de forma a obter-se coordenação entre eles. Os testes iniciam-se com valores baixos para as variáveis de corrente de *pickup* e de ajuste no tempo, e, em caso de resposta não satisfatória no teste, refazem-se os testes aumentando gradativamente estes valores até obter uma resposta favorável ou atingir um limite de testes definido pelo usuário. Neste último caso, o teste é reiniciado com outro tipo de curva característica para o religador, as tentativas são seguidas na ordem: Curva IEC-SI, IEC-STI, IEC-VI, IEC-LTI, IEC-EI, IEEE-MI, IEEE-VI e IEEE-EI. Em caso de resposta negativa para todas as curvas assume-se que não é possível a coordenação e dimensiona-se o religador apenas para as características da corrente no

seu ponto. Este algoritmo pode ser observado no Anexo D. Para dimensionar a curva de neutro do religador e coordenar com os elos-fusíveis necessários, segue-se a mesma lógica que para a curva de fase, altera-se apenas a corrente de curto-circuito bifásica pela corrente de curto-circuito monofásica para considerar a coordenação.

3.2.6 Coordenação entre elo-fusível ou religador e disjuntor

Nesta etapa, utilizam-se os valores de elos-fusíveis dimensionados até então e a curva do religador definida anteriormente para realizar o ajuste da curva de proteção de fase do disjuntor. Para cada elo-fusível e religador relacionado ao disjuntor, realiza-se um teste para verificar se em todo o ponto, entre a corrente de curto-circuito mínima e a corrente de curto-circuito máxima, a curva característica de fase do disjuntor está afastado no tempo da curva característica do elo-fusível ou religador pelo mesmo fator de segurança definido anteriormente, de forma a obter-se coordenação entre eles. Os testes iniciam-se com valores baixos para as variáveis de corrente de *pickup* e de ajuste no tempo, e, em caso de resposta não satisfatória no teste, refazem-se os testes aumentando gradativamente estes valores até obter uma resposta favorável ou atingir o limite de testes definido. Neste último caso, o teste é reiniciado com outro tipo de curva característica para o religador, as tentativas são seguidas na ordem: Curva IEC-SI, IEC-STI, IEC-VI, IEC-LTI, IEC-EI, IEEE-MI, IEEE-VI e IEEE-EI. Em caso de resposta negativa para todas as curvas assume-se que não é possível a coordenação. Este algoritmo pode ser observado no Anexo E. Para dimensionar a curva de neutro do religador e coordenar com os elos-fusíveis necessários, segue-se a mesma lógica que para a curva de fase, altera-se apenas a corrente de curto-circuito bifásica pela corrente de curto-circuito monofásica para considerar a coordenação.

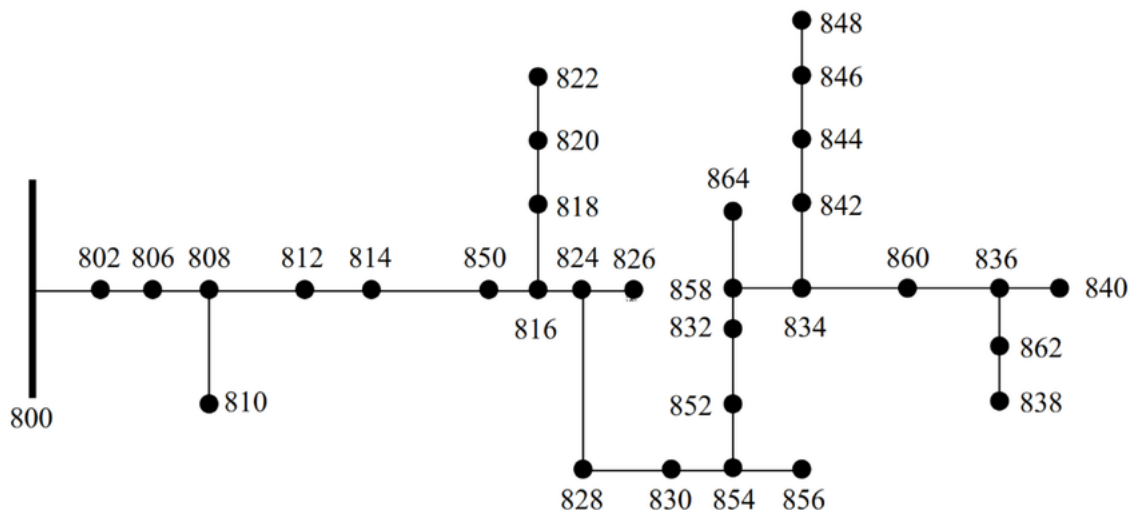
4 Experimentos e Resultados

4.1 Definição das redes elétricas

O software OpenDSS[®] possui uma biblioteca de modelos de redes elétricas de distribuição padronizados pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE). Estas redes são, usualmente, compostas por uma subestação com seu respectivo transformador, um ramo principal de distribuição, os ramos secundários derivados do ramo principal, cargas distribuídas ao longo de toda a rede e demais dispositivos, que podem estar ou não presentes, como transformadores e reguladores de tensão. Nesta biblioteca, estão incluídos os sistemas de 4 nós (com diversas variações), 13 nós, 34 nós, 37 nós e 123 nós. Foi decidido por utilizar destes modelos para a realização deste projeto pois são redes já modeladas no OpenDSS, com testes de corrente, carga e curtos-circuitos e sendo as redes IEEE já utilizadas para validar diversos trabalhos acadêmicos.

Para validar o algoritmo desenvolvido, adotou-se o sistema IEEE de 34 nós que pode ser observado na Figura 21. Este foi escolhido por possuir ramos de média tensão, uma rede principal (tronco) bem definida, além de ser um alimentador longo, no qual é possível termos religadores ao longo da rede.

Figura 21 – Rede de distribuição IEEE 34 nós.

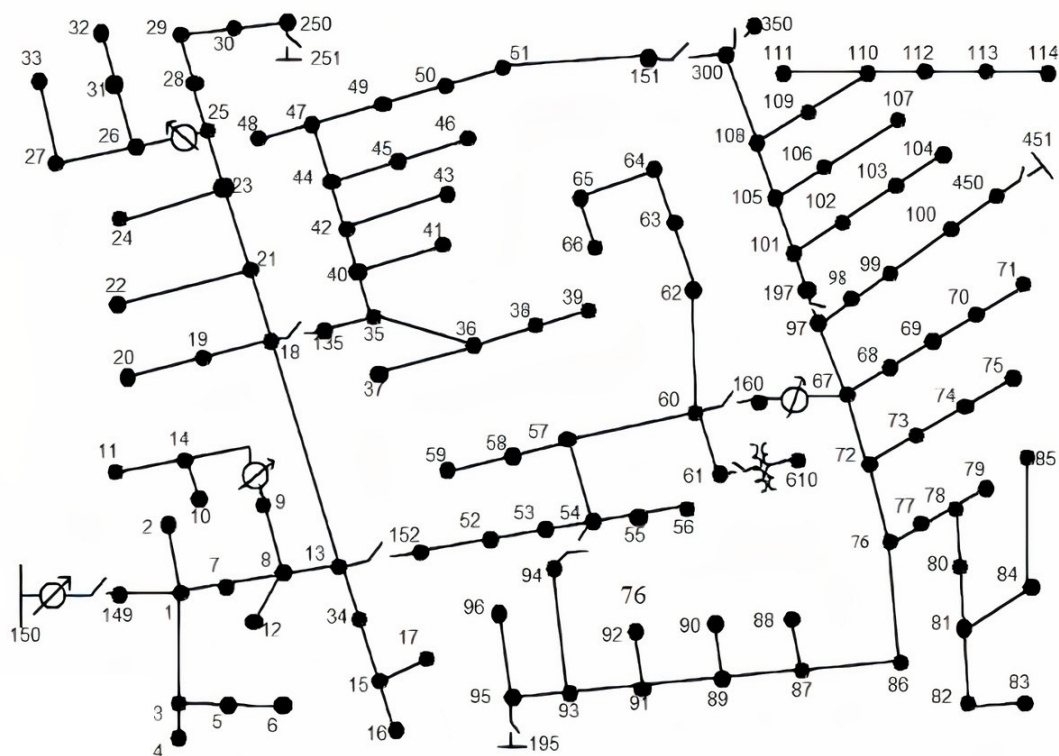


Fonte: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, 1992.

O alimentador desta rede é uma representação de parte de um alimentador real no estado do Arizona, nos Estados Unidos. É caracterizado por possuir uma tensão nominal de 24,9 kV, dois reguladores de tensão, um transformador rebaixador para a tensão de 4,16 kV, cargas desbalanceadas e capacitores shunt.

Para a realização de um teste mais robusto, foi determinado que o sistema IEEE de 123 nós seria utilizado. Desta forma, o código foi validado para um rede de distribuição muito mais complexa do que a utilizada para os testes iniciais. Este sistema pode ser visualizado na Figura 22. Este sistema opera numa tensão nominal de 4,16 kV, o que faz necessário que sejam utilizados reguladores de tensão e capacitores shunt para suavizar os problemas de queda de tensão. Este alimentador é caracterizado pela presença de cargas desbalanceadas com corrente, impedância e potência constantes, e diversas chaves ao longo da rede.

Figura 22 – Rede de distribuição IEEE 123 nós.



Fonte: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, 1992.

Para o dimensionamento das proteções em todos os sistemas experimentados, utilizou-se o valor de 4,5% para o fator de crescimento e um horizonte de 5 anos.

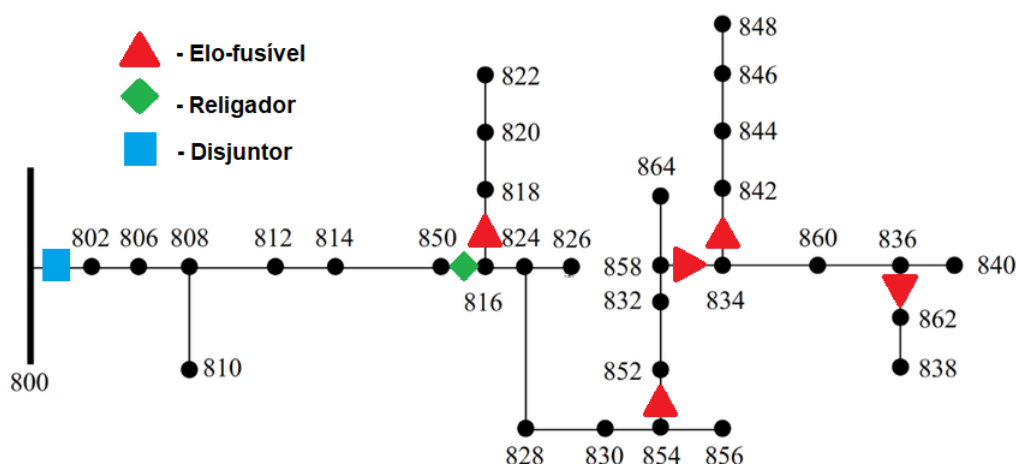
4.1.1 Sistema de 34 nós

4.1.1.1 Experimento 1

Para o primeiro experimento, executou-se o código utilizando o sistema IEEE de 34 nós utilizando a configuração dos dispositivos de proteção conforme itens que seguem e desenho da Figura 23:

- Elos-fusíveis nos nós: 818, 852, 834, 842 e 862;
- Religador no nó 816;
- Disjuntor no nó 802 da saída da subestação.

Figura 23 – Rede do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.



Fonte: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, 1992 (modificado).

Ao executar o programa com esta configuração obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 8. Nesta, são apresentados os dados utilizados para o dimensionamento de cada elo-fusível no nó em que foi indicado, levando em conta a Equação 2.6 e a capacidade de atendimento do curto-circuito. Na apresentação, I_{carga} é a corrente de carga no local do elo, I_{ccmax} é a corrente corrente de curto-circuito trifásica máxima no local do elo e I_{ccminF} é a corrente de curto-circuito monofásico mínima no final do trecho protegido pelo elo.

Para a situação simulada, obteve-se duas indefinições para os elos-fusíveis propostos. A justificativa é indicada pela coluna "FlagIndef", 0 indica que foi possível definir um elo, 1 indica que não foi possível por causa das características limites do local onde foi proposto (I_{carga} e I_{ccminF}) e 2 indica que não foi possível realizar a coordenação com o elo protetor.

Tabela 8 – Resultados dos elos do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.

Nó	Icarga (A)	Iccmax (A)	IccminF (A)	FlagIndef	Resultado
818	13,03	739,91	155,40	0	25K
852	36,52	614,94	159,39	1	Indef
834	23,24	584,65	151,56	1	Indef
842	16,30	583,90	151,39	0	25K
862	2,091	571,56	148,98	0	6K

O Autor, 2022

Para comprovar os resultados do programa, utilizamos a Equação 2.6 e a tabela de coordenação da Figura 11.

- Elo do nó 818:

$$1,246 \times 13,03 < x < \frac{155,4}{4} \quad (4.1)$$

$$16,235 < x < 38,85 \quad (4.2)$$

Desta forma, o único elo-fusível possível no intervalo é o 25K.

- Elo do nó 842:

$$1,246 \times 16,30 < x < \frac{151,39}{4} \quad (4.3)$$

$$20,31 < x < 37,85 \quad (4.4)$$

Desta forma, o único elo-fusível possível no intervalo é o 25K.

- Elo do nó 862:

$$1,246 \times 2,091 < x < \frac{148,98}{4} \quad (4.5)$$

$$2,6 < x < 37,245 \quad (4.6)$$

Desta forma, os elos possíveis no intervalo são o 6K, o 10K, o 15K e o 25K, portanto escolhemos o menor, 6K.

- Elo do nó 834:

$$1,246 \times 23,24 < x < \frac{151,56}{4} \quad (4.7)$$

$$28,96 < x < 37,89 \quad (4.8)$$

Desta forma, nenhum elo é possível no intervalo, e ele fica como "Indefinido".

- Elo do nó 852:

$$1,246 \times 36,52 < x < \frac{159,19}{4} \quad (4.9)$$

$$45,5 < x < 39,8 \quad (4.10)$$

Desta forma, nenhum elo é possível no intervalo, e ele fica como "Indefinido".

O dimensionamento do religador e do disjuntor caracterizá-se pela definição dos seus respectivos parâmetros. Os resultados para este experimento pode ser visto na Tabela 9, para o religador, e na Tabela 10, para o disjuntor. A curva de fase de ambos deve atender as respectivas correntes de curto-circuito bifásico (Icc2) e trifásico (Icc3) nos pontos a serem instalados, da mesma forma, a curva de neutro deve atender as correntes de curto-circuito monofásico (Icc1) e trifásico (Icc3).

Tabela 9 – Resultados do religador do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.

Nó	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	F/N	Curva	Ipickup (A)	TD	Iinst (A)
816	250	452	905	F	IEC-SI	192	0,07	1086
816	250	452	905	N	IEC-SI	77	0,12	1086

O Autor, 2022

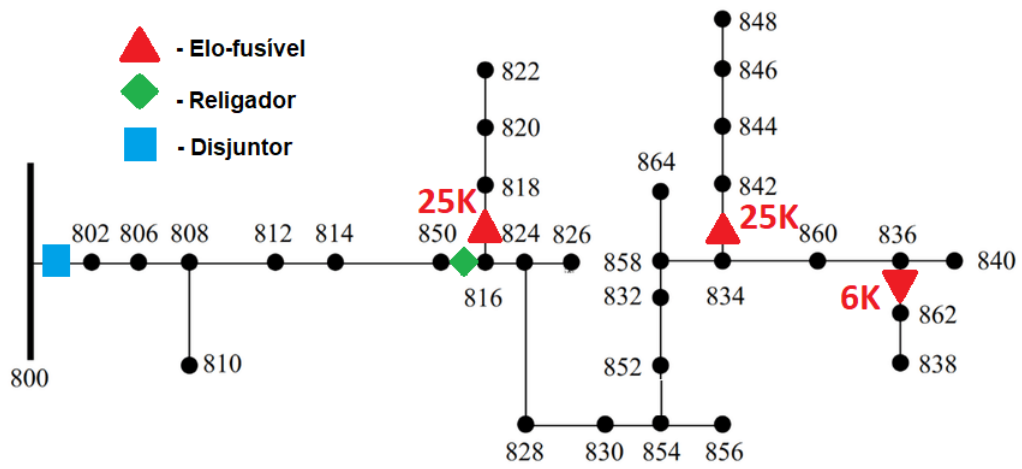
Tabela 10 – Resultados do disjuntor do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.

Nó	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	F/N	Curva	Ipickup (A)	TD	Iinst (A)
802	617	897	1794	F	IEC-SI	252	0,12	2152
802	617	897	1794	N	IEC-SI	163	0,16	2152

O Autor, 2022

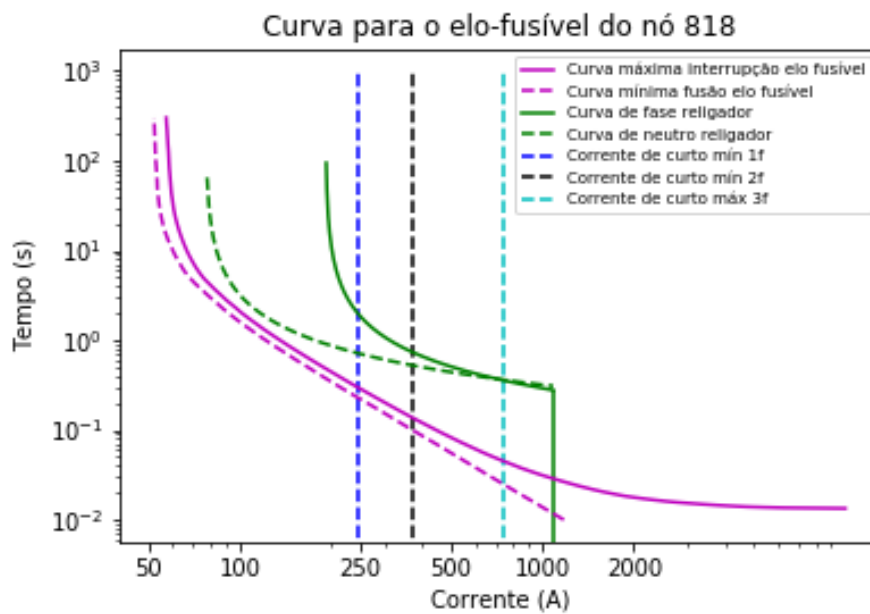
O sistema e os gráficos dos resultados são mostrados a seguir:

Figura 24 – Sistema de 34 nós após primeiro experimento.



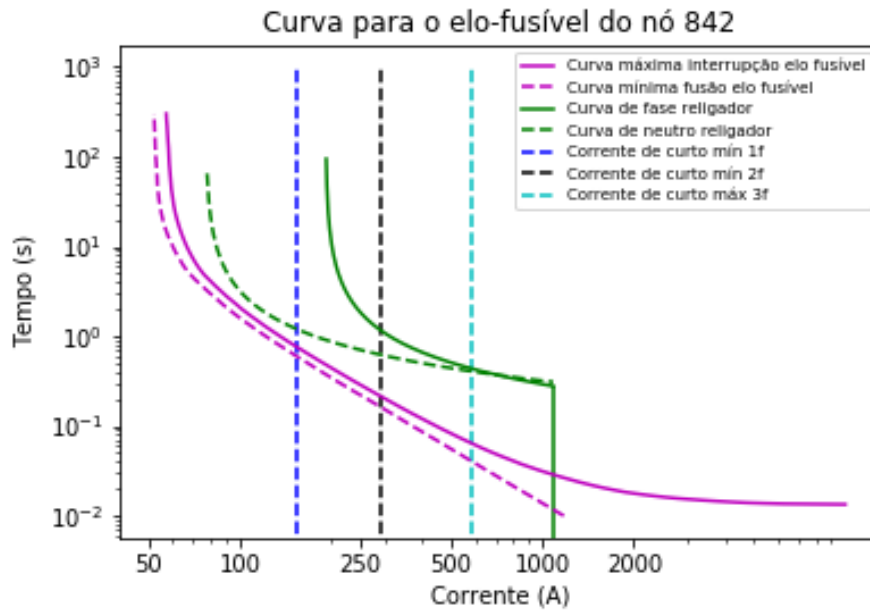
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 25 – Coordenograma do elo 818 com o religador.



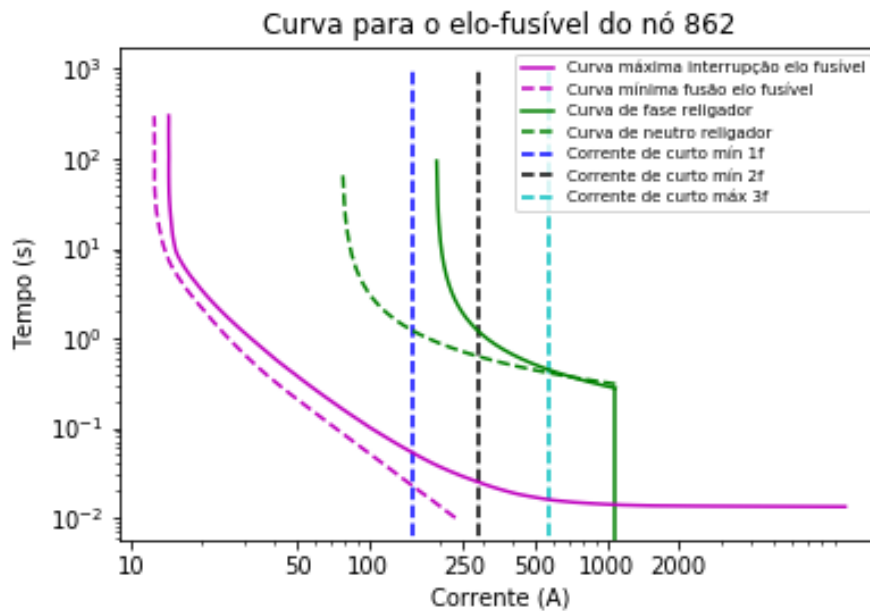
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 26 – Coordenograma do elo 842 com o religador.



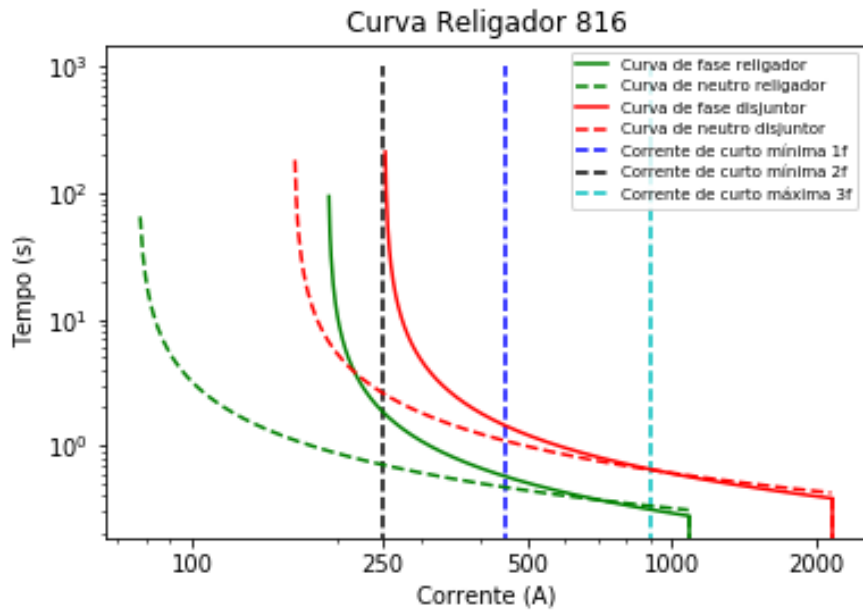
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 27 – Coordenograma do elo 862 com o religador.



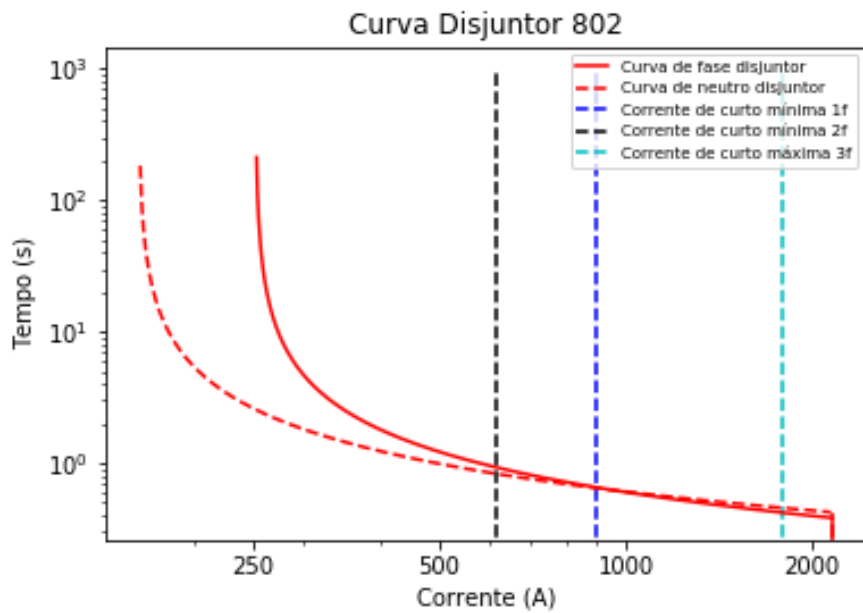
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 28 – Coordenograma do religador com o disjuntor.



Fonte: O Autor, 2022.

Figura 29 – Coordenograma do disjuntor.



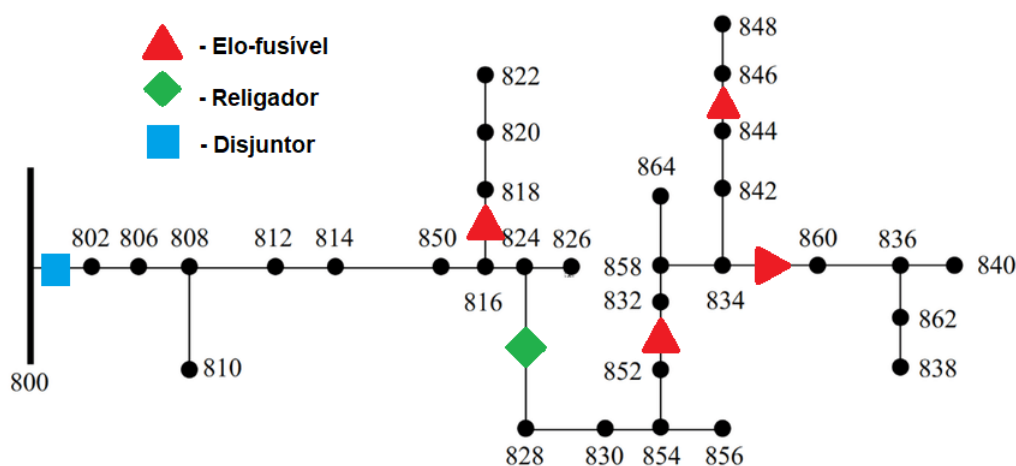
Fonte: O Autor, 2022.

4.1.1.2 Experimento 2

Para o segundo experimento utilizando o sistema IEEE de 34 nós, configurou-se os dispositivos de proteção conforme itens que seguem e desenho da Figura 30:

- Elos-fusíveis nos nós: 860, 846, 818, 832;
- Religador no nó 828;
- Disjuntor no nó 802 da saída da subestação.

Figura 30 – Rede do segundo experimento com o sistema de 34 nós.



Fonte: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, 1992 (modificado).

Ao rodar o programa com esta configuração obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 11. Nesta, são apresentados os dados utilizados para o dimensionamento de cada elo-fusível no nó em que foi indicado, levando em conta a Equação 2.6 e a capacidade de atendimento do curto-circuito. Na apresentação, I_{carga} é a corrente de carga no local do elo, I_{ccmax} é a corrente corrente de curto-circuito trifásica máxima no local do elo e I_{ccminF} é a corrente de curto-circuito monofásico mínima no final do trecho protegido pelo elo.

Tabela 11 – Resultados dos elos do segundo experimento com o sistema de 34 nós.

Nó	I_{carga} (A)	I_{ccmax} (A)	I_{ccminF} (A)	FlagIndef	Resultado
860	7,68	579,3	149,0	0	10K
846	9,81	570,8	151,4	0	15K
818	13,0	739,9	155,4	0	25K
832	34,0	614,9	159,2	1	Indef

Para a situação simulada, obteve-se apenas uma indefinição para os elos-fusíveis propostos. A justificativa é indicada pela coluna "FlagIndef", 0 indica que foi possível definir um elo, 1 indica que não foi possível por causa das características do local onde foi proposto (Icarga e IccminF) e 2 indica que não foi possível realizar a coordenação com o elo protetor.

Para comprovar os resultados do programa, utilizamos a Equação 2.6 e a tabela de coordenação da Figura 11.

- Elo do nó 860:

$$1,246 \times 7,68 < x < \frac{149}{4} \quad (4.11)$$

$$9,57 < x < 37,25 \quad (4.12)$$

Desta forma, os únicos elos-fusíveis possíveis no intervalo são o 10K, o 15K e o 25K. Desta forma, escolhemos o de menor valor, 10K.

- Elo do nó 846:

$$1,246 \times 9,81 < x < \frac{151,4}{4} \quad (4.13)$$

$$12,22 < x < 37,85 \quad (4.14)$$

Desta forma, os únicos elos-fusíveis possíveis no intervalo são o 15K e o 25K, utilizamos o menor valor de 15K.

- Elo do nó 818:

$$1,246 \times 13,00 < x < \frac{155,4}{4} \quad (4.15)$$

$$16,23 < x < 38,85 \quad (4.16)$$

Desta forma, o único elo possível no intervalo é o 25K.

- Elo do nó 832:

$$1,246 \times 34,00 < x < \frac{159,2}{4} \quad (4.17)$$

$$42,364 < x < 39,8 \quad (4.18)$$

Desta forma, nenhum elo é possível no intervalo, e ele fica como "Indefinido".

O dimensionamento do religador e do disjuntor caracterizá-se pela definição dos seus respectivos parâmetros. Os resultados para este experimento pode ser visto na Tabela 12, para o religador, e na Tabela 13, para o disjuntor. A curva de fase de ambos deve atender as respectivas correntes de curto-circuito bifásico (Icc2) e trifásico (Icc3) nos

pontos a serem instalados, da mesma forma, a curva de neutro deve atender as correntes de curto-circuito monofásico (I_{cc1}) e trifásico (I_{cc3}).

Tabela 12 – Resultados do religador do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.

Nó	I_{cc1} (A)	I_{cc2} (A)	I_{cc3} (A)	F/N	Curva	I_{pickup} (A)	TD	I_{inst} (A)
828	231	422	844	F	IEC-SI	182	0,06	1012
828	231	422	844	N	IEC-SI	72	0,11	1012

O Autor, 2022

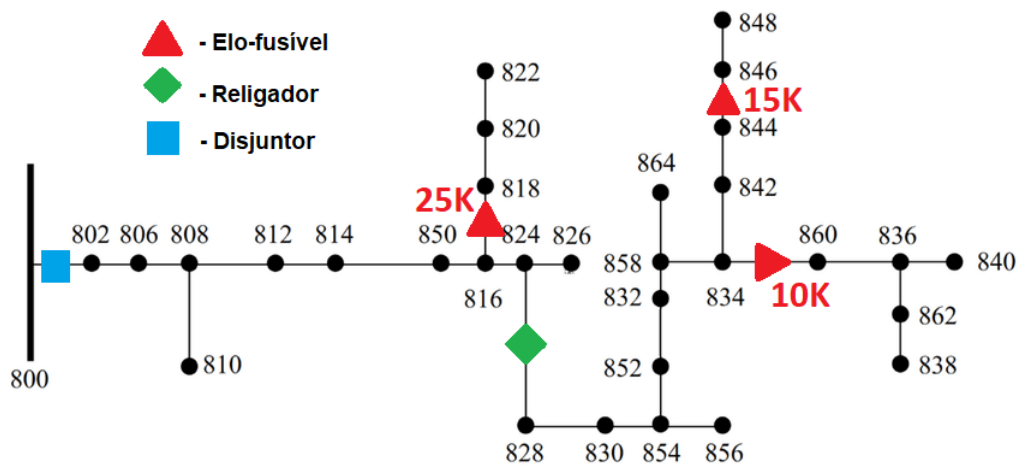
Tabela 13 – Resultados do disjuntor do primeiro experimento com o sistema de 34 nós.

Nó	I_{cc1} (A)	I_{cc2} (A)	I_{cc3} (A)	F/N	Curva	I_{pickup} (A)	TD	I_{inst} (A)
802	617	897	1794	F	IEC-SI	242	0,11	2152
802	617	897	1794	N	IEC-SI	192	0,13	2152

O Autor, 2022

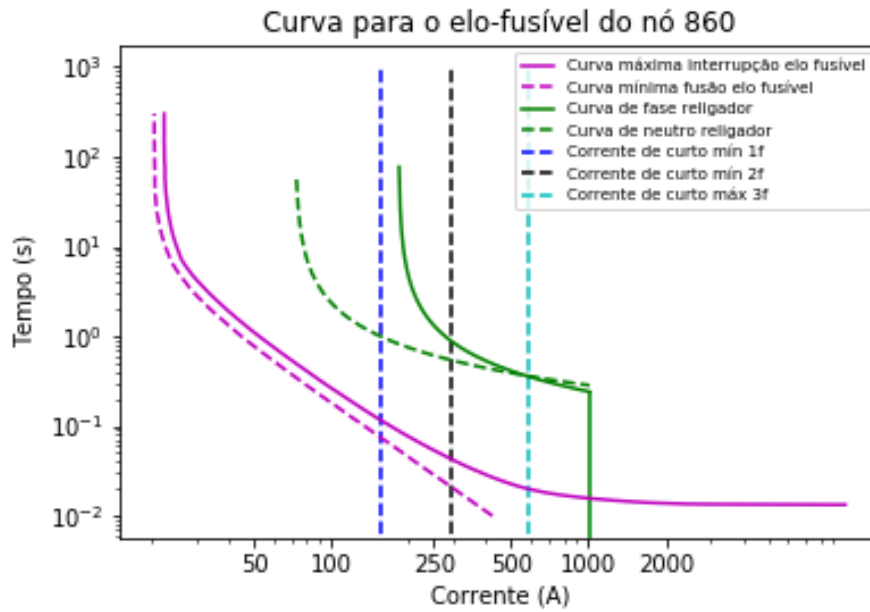
O sistema e os gráficos dos resultados são mostrados a seguir:

Figura 31 – Sistema de 34 nós após segundo experimento.



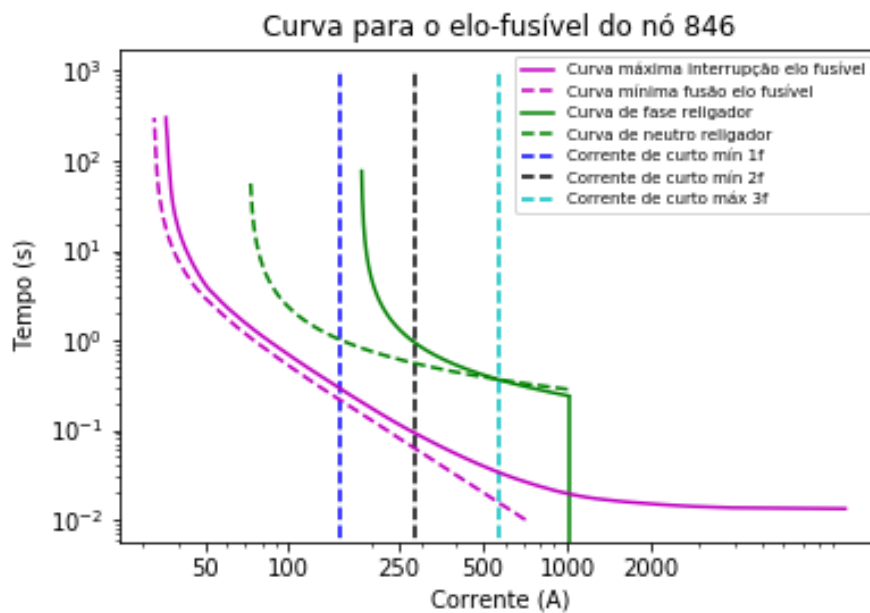
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 32 – Coordenograma do elo 860 com o religador.



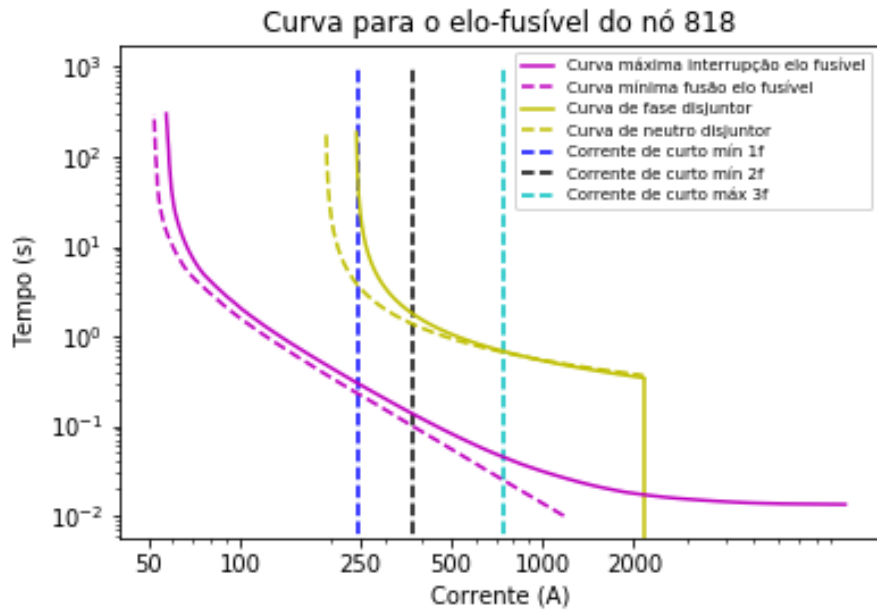
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 33 – Coordenograma do elo 846 com o religador.



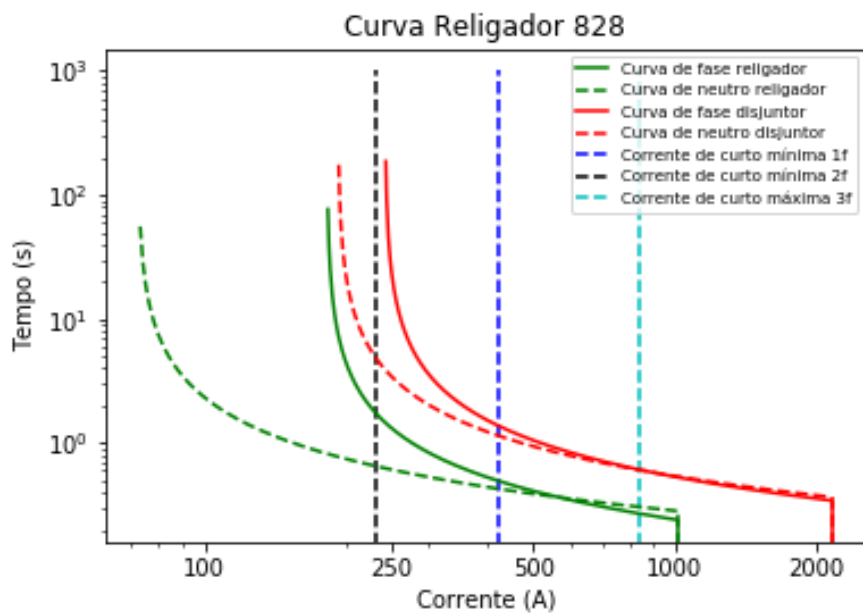
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 34 – Coordenograma do elo 818 com o disjuntor.



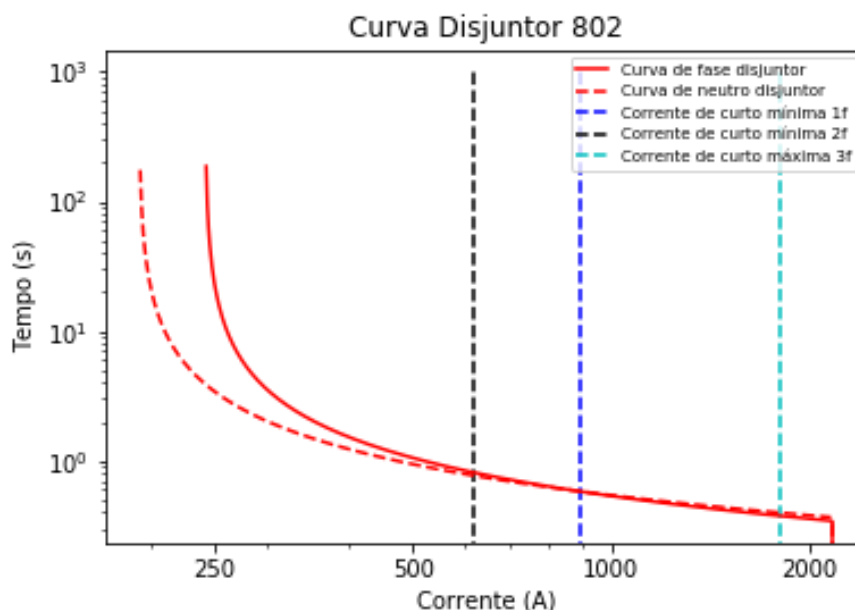
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 35 – Coordenograma do religador com o disjuntor.



Fonte: O Autor, 2022.

Figura 36 – Coordenograma do disjuntor.



Fonte: O Autor, 2022.

4.1.2 Sistema de 123 nós

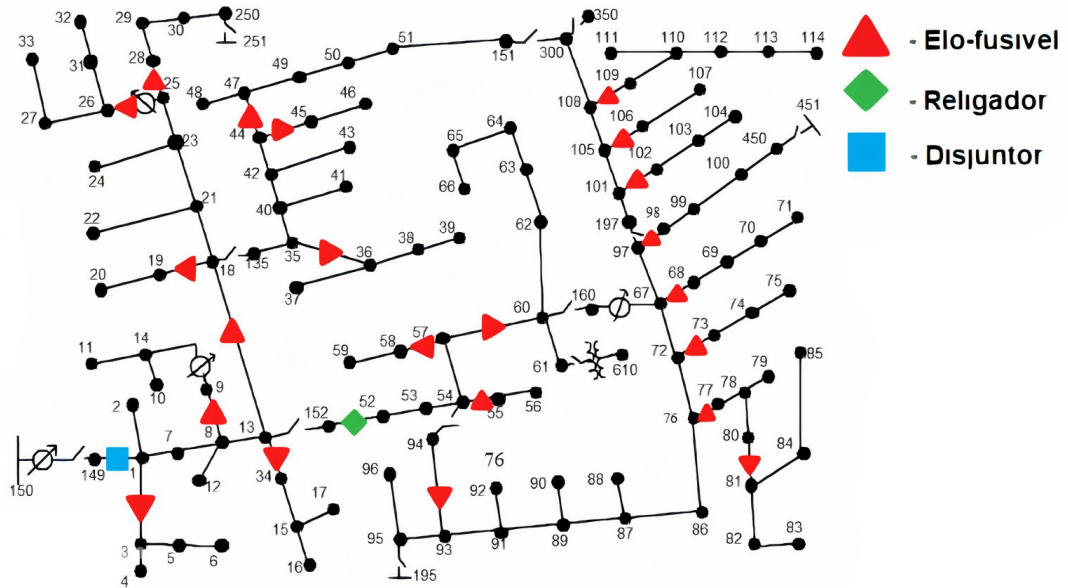
4.1.2.1 Experimento 1

Também, executou-se o código utilizando o sistema IEEE de 123 nós utilizando a configuração dos dispositivos de proteção conforme itens que seguem e desenho da Figura 37:

- Elos-fusíveis nos nós: 3, 9, 34, 19, 26, 28, 45, 47, 36, 58, 55, 60, 93, 77, 73, 68, 98, 102, 106, 109, 81 e 18;
- Religador no nó 52;
- Disjuntor no nó 1 da saída da subestação.

Ao rodar o programa com esta configuração obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 14. Nesta, são apresentados os dados utilizados para o dimensionamento de cada elo-fusível no nó em que foi indicado, levando em conta a Equação 2.6 e a capacidade de atendimento do curto-circuito. Na apresentação, I_{carga} é a corrente de carga no local do elo, I_{ccmax} é a corrente corrente de curto-circuito trifásica máxima no local do elo e I_{ccminF} é a corrente de curto-circuito monofásico mínima no final do trecho protegido pelo elo.

Figura 37 – Rede do primeiro experimento com o sistema de 123 nós.



Fonte: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, 1992 (modificado).

Tabela 14 – Resultados dos elos do primeiro experimento com o sistema de 123 nós.

Nó	I _{carga} (A)	I _{ccmax} (A)	I _{ccminF} (A)	FlagIndef	Resultado
3	46,58	7.600	2.108	0	65K
9	46,54	6.853	1.881	0	65K
34	46,41	6.604	1.925	0	65K
19	37,49	5.523	1.701	0	65K
26	18,63	6.011	1.408	0	25K
28	37,03	6.098	1.470	0	65K
45	18,81	4.722	1.478	0	25K
47	89,59	5.901	1.431	1	Indef
36	18,36	6.128	1.470	0	25K
58	18,27	5.318	1.670	0	25K
55	9,206	6.732	1.817	0	15K
60	290,3	6.115	1.310	1	Indef
93	18,00	4.698	1.352	2	Indef
77	78,15	5.379	1.237	1	Indef
73	55,26	4.326	1.253	1	Indef
68	54,07	4.533	1.276	1	Indef
98	19,35	5.571	1.203	0	25K
102	45,00	4.244	1.176	0	65K
106	35,83	4.089	1.229	0	65K
109	64,69	3.765	1.024	1	Indef
81	87,22	4.876	1.036	1	Indef
18	229,08	6.878	1.711	1	Indef

Para a situação simulada, obteve-se nove indefinições para os elos-fusíveis propostos. A justificativa é indicada pela coluna "FlagIndef", 0 indica que foi possível definir um elo, 1 indica que não foi possível por causa das características do local onde foi proposto (Icarga e IccminF) e 2 indica que não foi possível realizar a coordenação com o elo protetor.

O dimensionamento do religador e do disjuntor caracterizá-se pela definição dos seus respectivos parâmetros. Os resultados para este experimento pode ser visto na Tabela 15, para o religador, e na Tabela 16, para o disjuntor. A curva de fase de ambos deve atender as respectivas correntes de curto-circuito bifásico (Icc2) e trifásico (Icc3) nos pontos a serem instalados, da mesma forma, a curva de neutro deve atender as correntes de curto-circuito monofásico (Icc1) e trifásico (Icc3).

Tabela 15 – Resultados do religador do primeiro experimento com o sistema de 123 nós.

Nó	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	F/N	Curva	Ipickup (A)	TD	Iinst (A)
52	2.124	3.631	7.262	F	IEC-SI	476	0,12	8714
52	2.124	3.631	7.262	N	IEC-SI	262	0,14	8714

O Autor, 2022

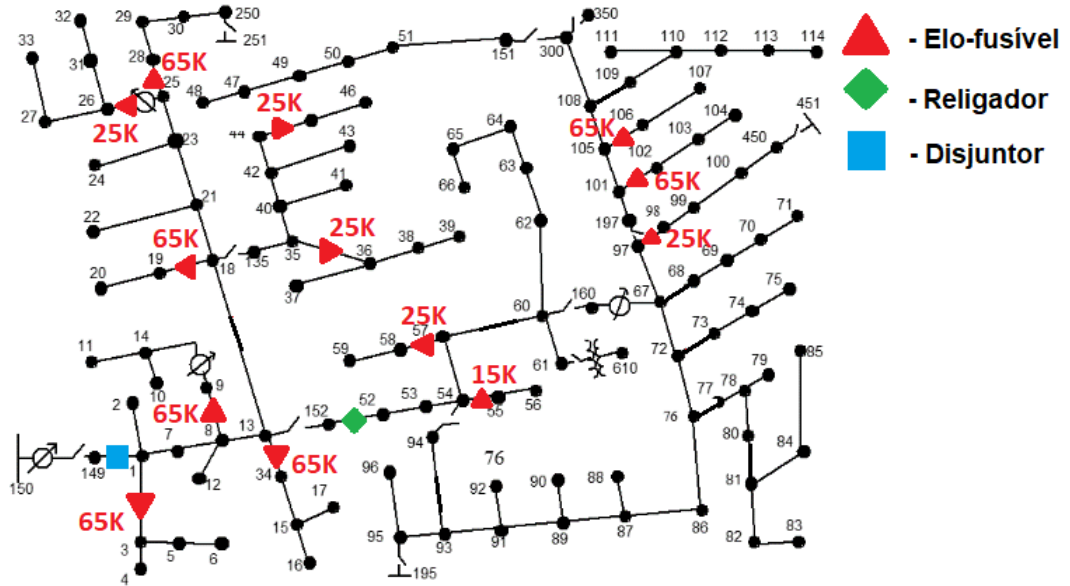
Tabela 16 – Resultados do disjuntor do primeiro experimento com o sistema de 123 nós.

Nó	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	F/N	Curva	Ipickup (A)	TD	Iinst (A)
1	2.761	4.303	8.607	F	IEC-SI	586	0,23	10328
1	2.761	4.303	8.607	N	IEC-SI	415	0,26	10328

O Autor, 2022

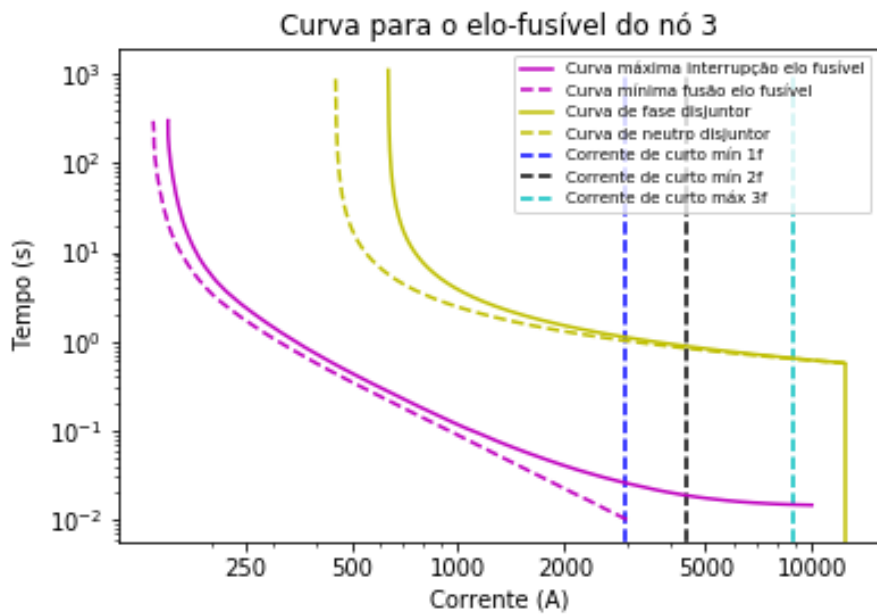
O sistema e os gráficos dos resultados são mostrados a seguir:

Figura 38 – Sistema de 123 nós após primeiro experimento.



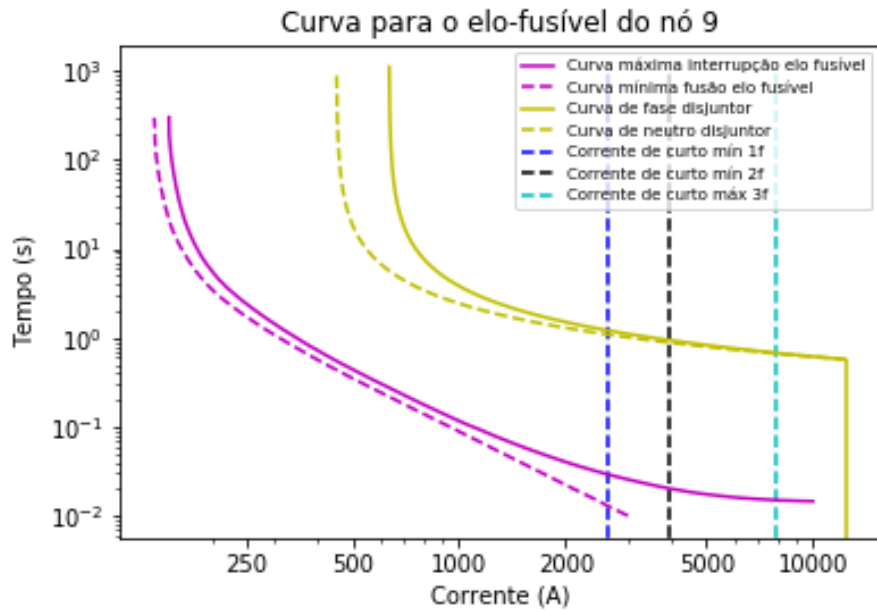
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 39 – Coordenograma do elo 3 com o disjuntor.



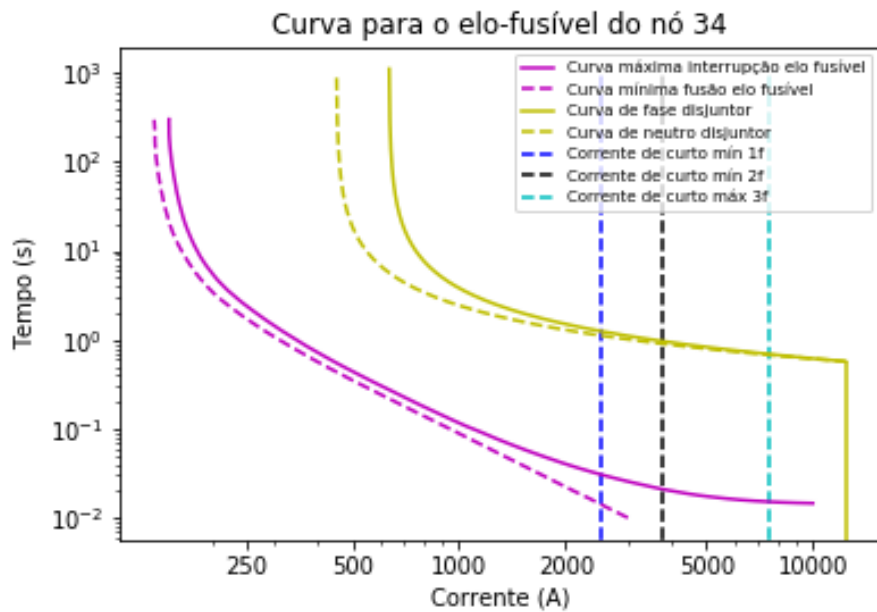
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 40 – Coordenograma do elo 9 com o disjuntor.



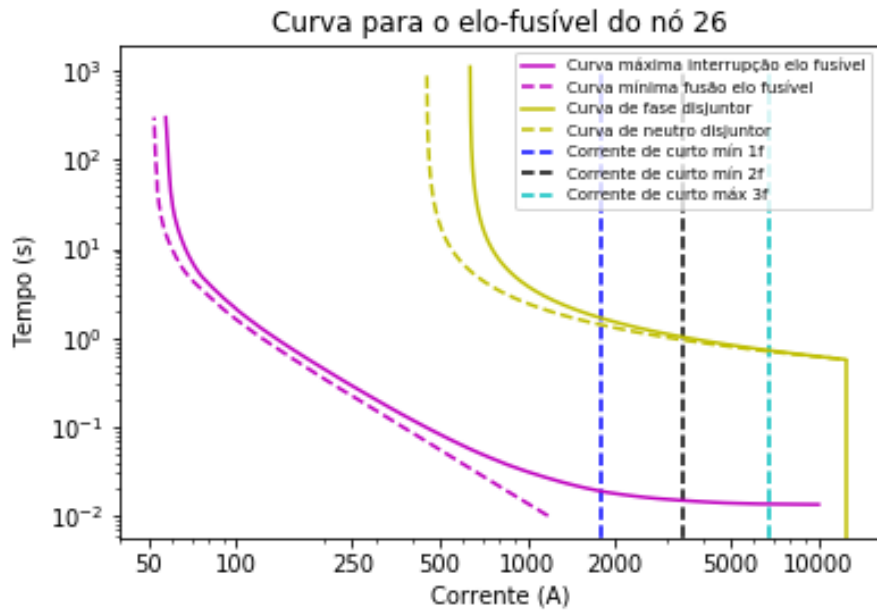
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 41 – Coordenograma do elo 34 com o disjuntor.



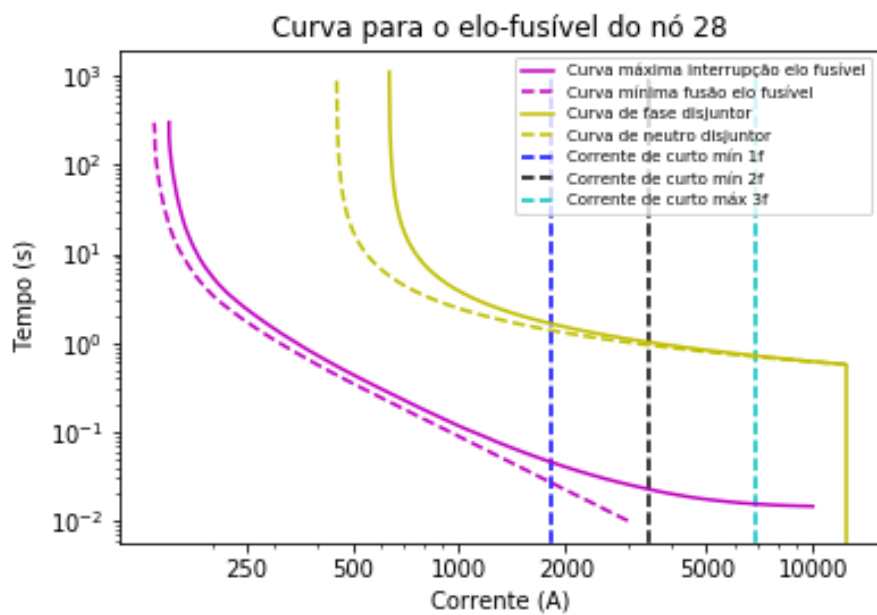
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 42 – Coordenograma do elo 26 com o disjuntor.



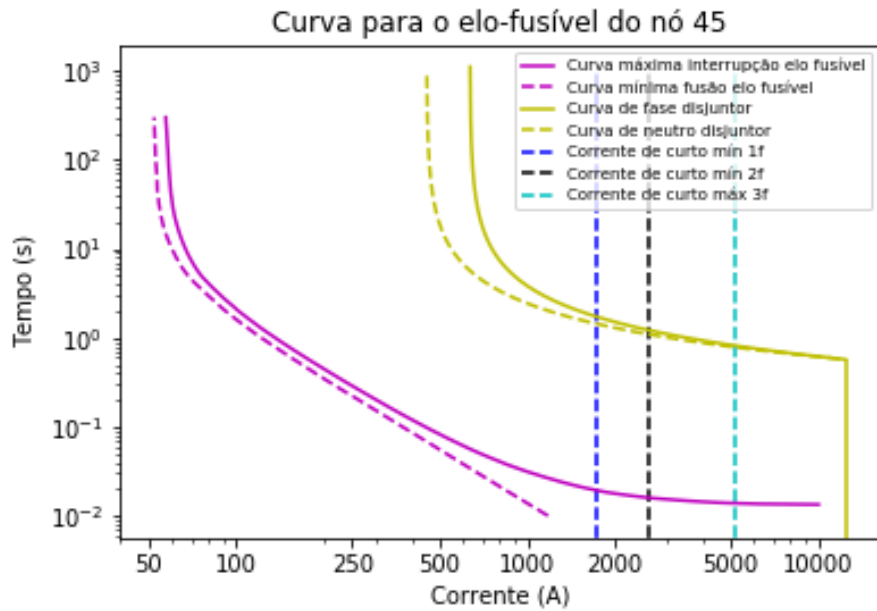
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 43 – Coordenograma do elo 28 com o disjuntor.



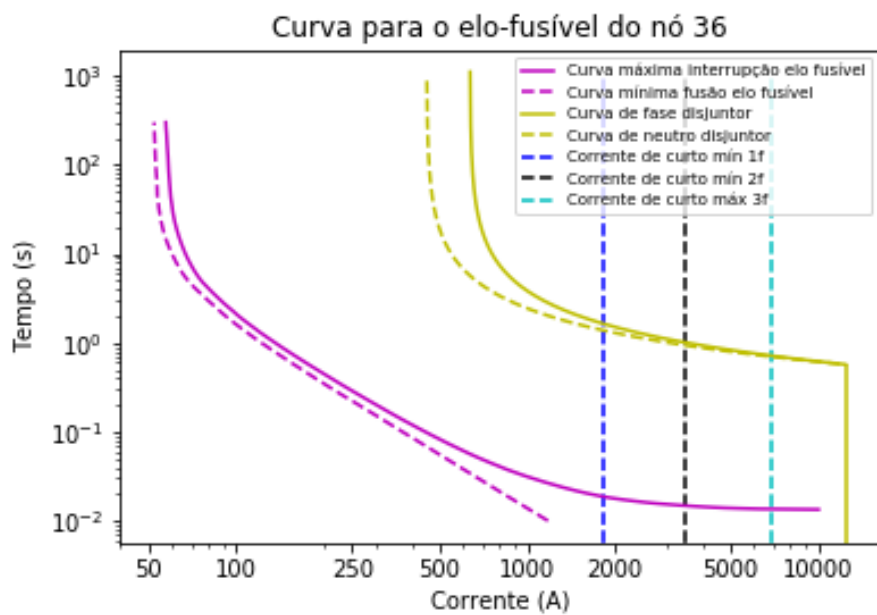
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 44 – Coordenograma do elo 45 com o disjuntor.



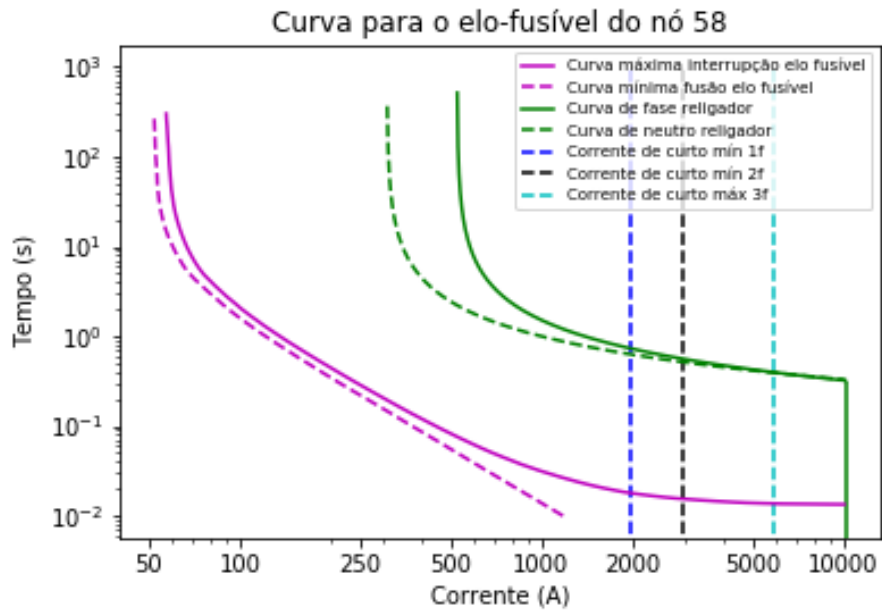
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 45 – Coordenograma do elo 36 com o disjuntor.



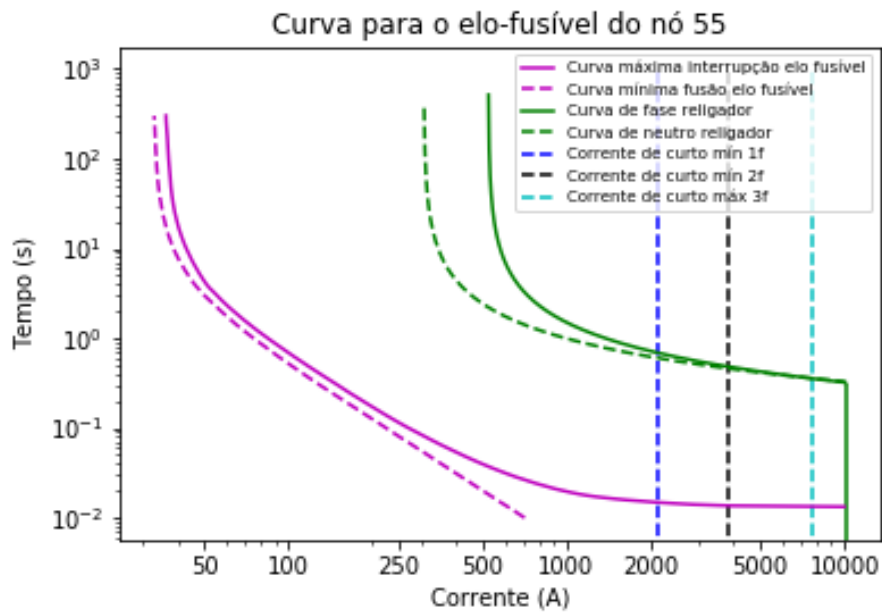
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 46 – Coordenograma do elo 58 com o religador.



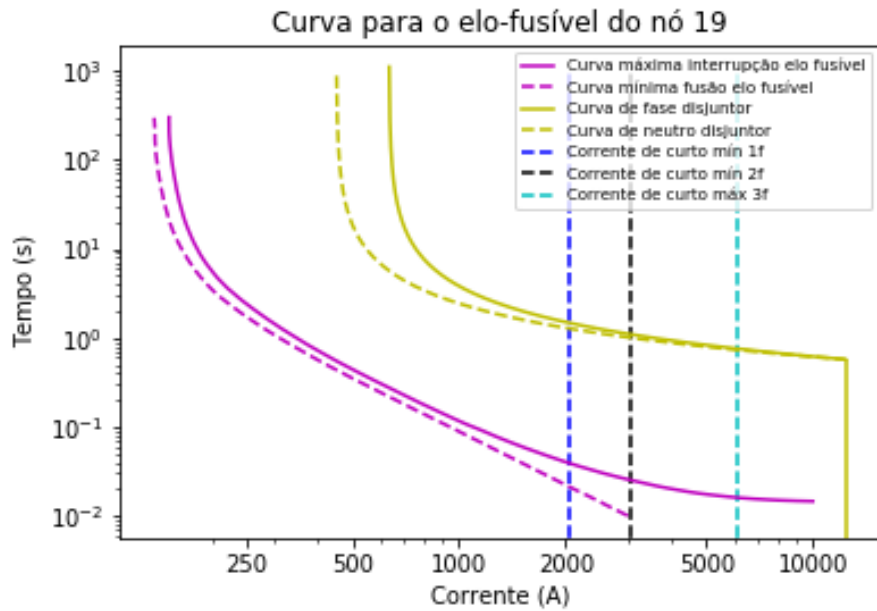
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 47 – Coordenograma do elo 55 com o religador.



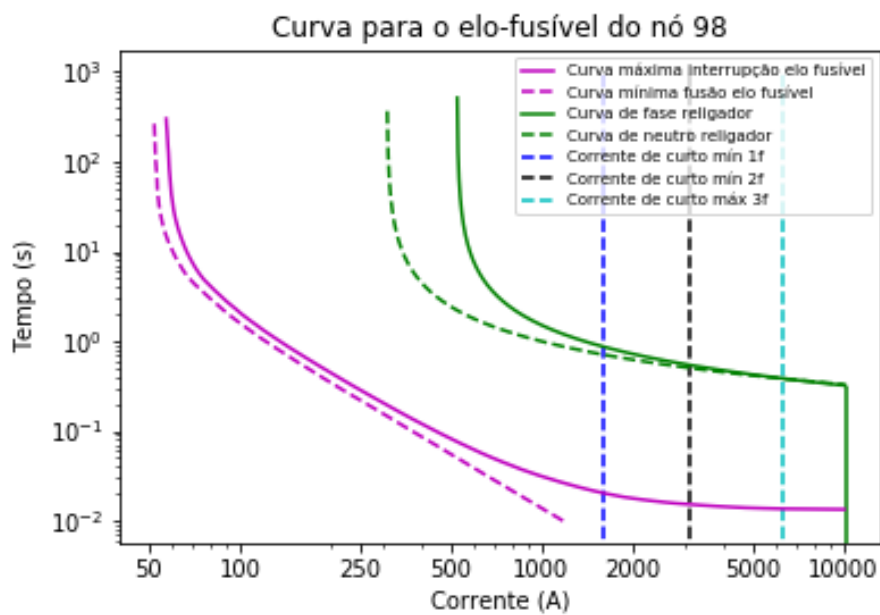
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 48 – Coordenograma do elo 19 com o disjuntor.



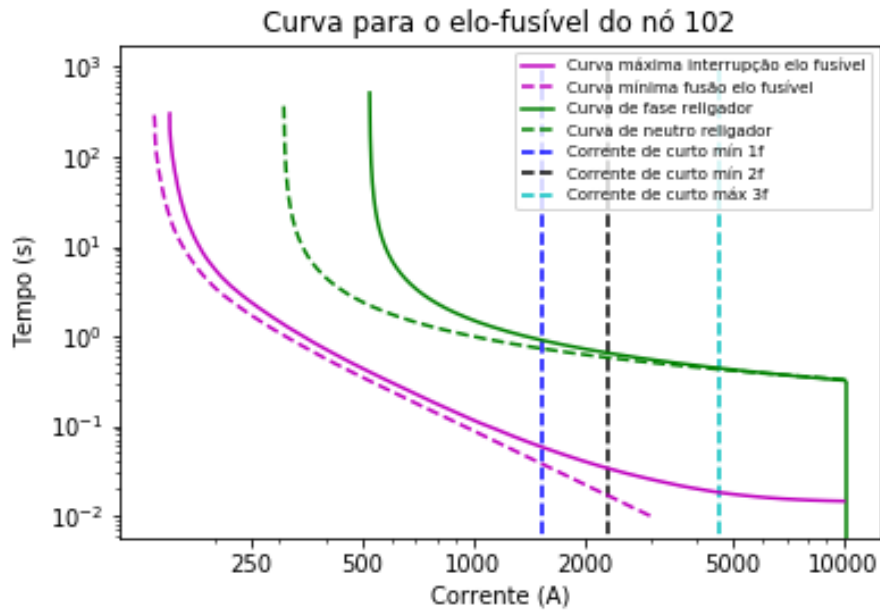
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 49 – Coordenograma do elo 98 com o religador.



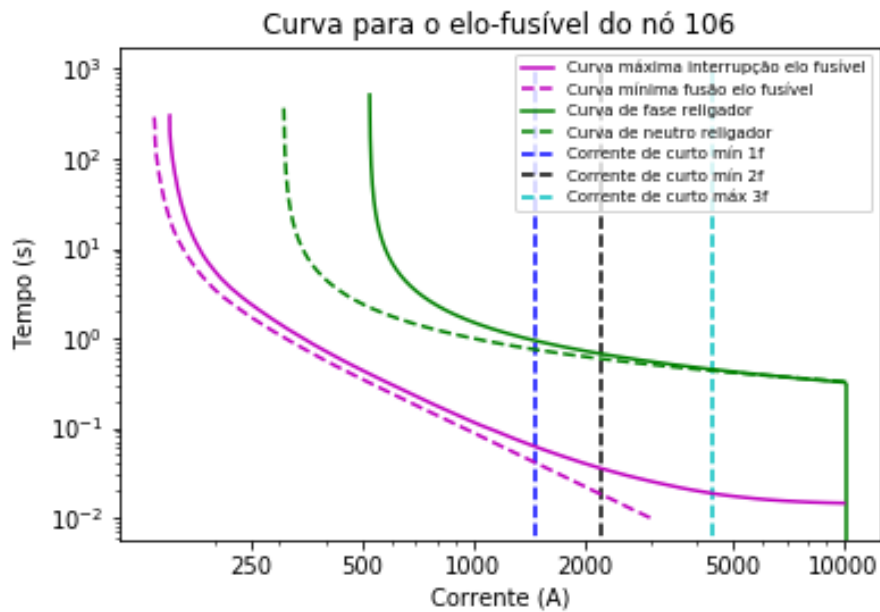
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 50 – Coordenograma do elo 102 com o religador.



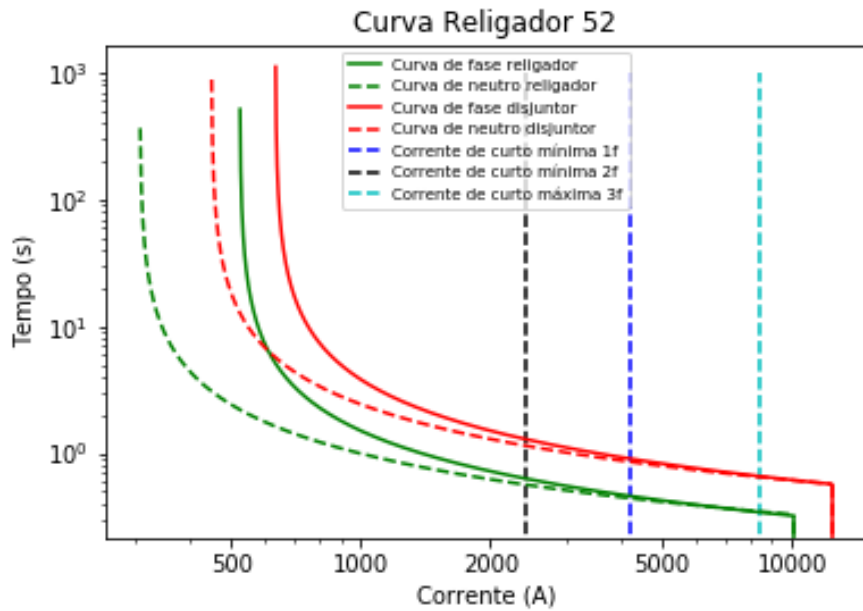
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 51 – Coordenograma do elo 106 com o religador.



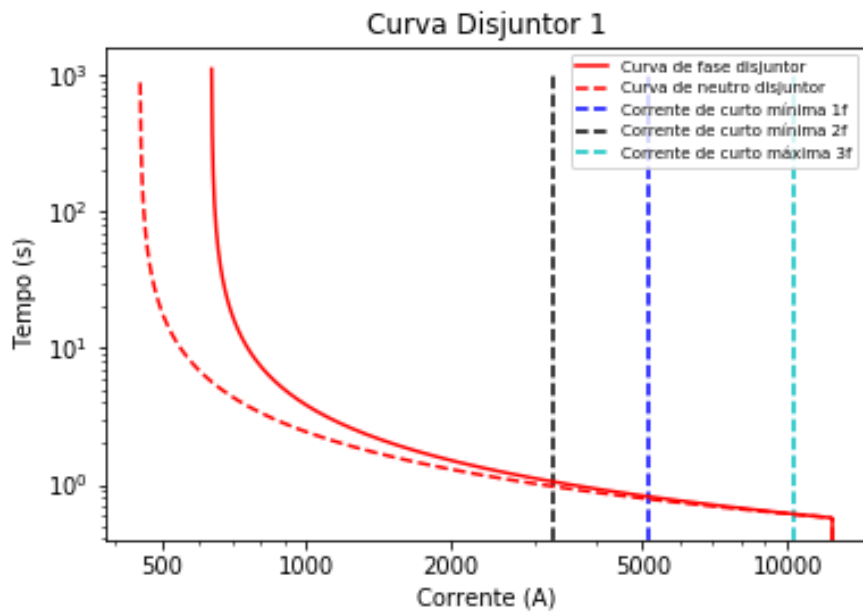
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 52 – Coordenograma do religador com o disjuntor.



Fonte: O Autor, 2022.

Figura 53 – Coordenograma do disjuntor.



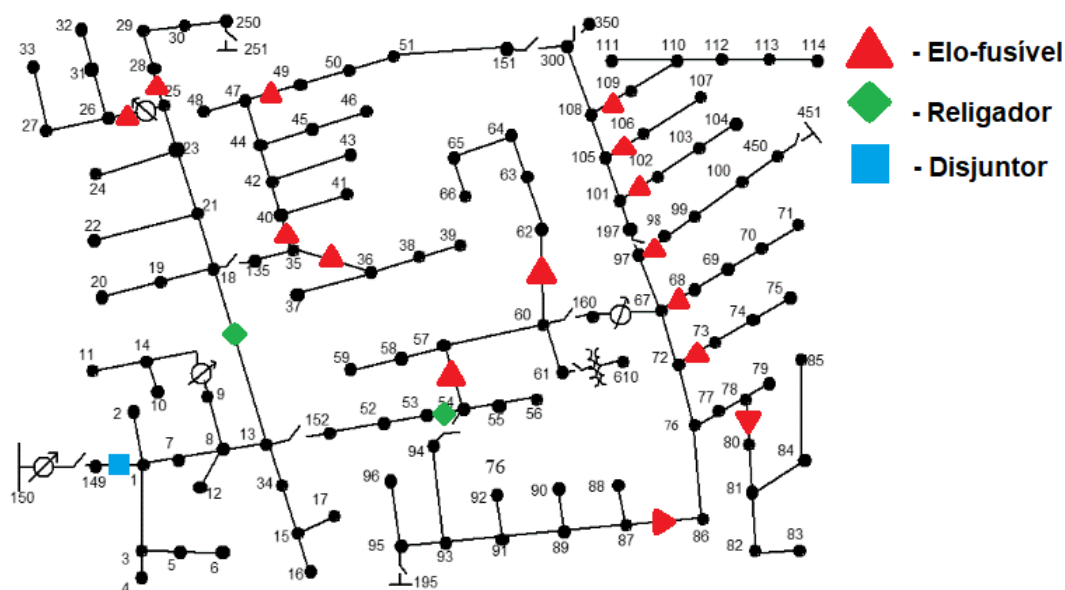
Fonte: O Autor, 2022.

4.1.2.2 Experimento 2

Para o segundo teste com o sistema IEEE de 123 nós utilizou-se a configuração dos dispositivos de proteção conforme itens que seguem e desenho da Figura 54:

- Elos-fusíveis nos nós: 57, 62, 36, 40, 49, 28, 26, 86, 80, 73, 68, 98, 102, 106 e 109;
- Religadores nos nós 18 e 54;
- Disjuntor no nó 1 da saída da subestação.

Figura 54 – Rede do segundo experimento com o sistema de 123 nós.



Fonte: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, 1992 (modificado).

Ao rodar o programa com esta configuração obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 17. Nesta, são apresentados os dados utilizados para o dimensionamento de cada elo-fusível no nó em que foi indicado, levando em conta a Equação 2.6 e a capacidade de atendimento do curto-circuito. Na apresentação, I_{carga} é a corrente de carga no local do elo, I_{ccmax} é a corrente corrente de curto-circuito trifásica máxima no local do elo e I_{ccminF} é a corrente de curto-circuito monofásico mínima no final do trecho protegido pelo elo.

Para a situação simulada, obteve-se oito indefinições para os elos-fusíveis propostos. A justificativa é indicada pela coluna "FlagIndef", 0 indica que foi possível definir um elo, 1 indica que não foi possível por causa das características do local onde foi proposto (I_{carga} e I_{ccminF}) e 2 indica que não foi possível realizar a coordenação com o elo protetor.

O dimensionamento do religador e do disjuntor caracterizá-se pela definição dos seus respectivos parâmetros. Os resultados para este experimento pode ser visto na Tabela

Tabela 17 – Resultados dos elos do segundo experimento com o sistema de 123 nós.

Nó	Icarga (A)	Iccmax (A)	IccminF (A)	FlagIndef	Resultado
57	290,3	6.671	1.671	1	Indef
62	80,90	5.923	1.310	1	Indef
36	18,36	6.128	1.470	0	25K
40	108,8	6.381	1.554	1	Indef
49	34,98	5.747	1.432	0	65K
28	37,03	6.098	1.511	0	65K
26	18,63	6.011	1.408	0	25K
86	57,21	5.225	1.365	1	Indef
80	80,85	5.092	1.036	1	Indef
73	55,26	4.326	1.253	1	Indef
68	54,07	4.533	1.276	1	Indef
98	19,35	5.571	1.319	0	25K
102	45,00	4.244	1.176	0	65K
106	35,83	4.089	1.229	0	65K
109	64,69	3.765	1.024	1	Indef

O Autor, 2022

18, para o religador, e na Tabela 19, para o disjuntor. A curva de fase de ambos deve atender as respectivas correntes de curto-circuito bifásico (Icc2) e trifásico (Icc3) nos pontos a serem instalados, da mesma forma, a curva de neutro deve atender as correntes de curto-circuito monofásico (Icc1) e trifásico (Icc3).

Tabela 18 – Resultados dos religadores do segundo experimento com o sistema de 123 nós.

Nó	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	F/N	Curva	Ipickup (A)	TD	Iinst (A)
18	1.963	3.439	6.878	F	IEC-SI	476	0,12	8254
18	1.963	3.439	6.878	N	IEC-SI	272	0,15	8254
54	1.999	3.482	6.965	F	IEC-SI	476	0,12	8358
54	1.999	3.482	6.965	N	IEC-SI	262	0,14	8358

O Autor, 2022

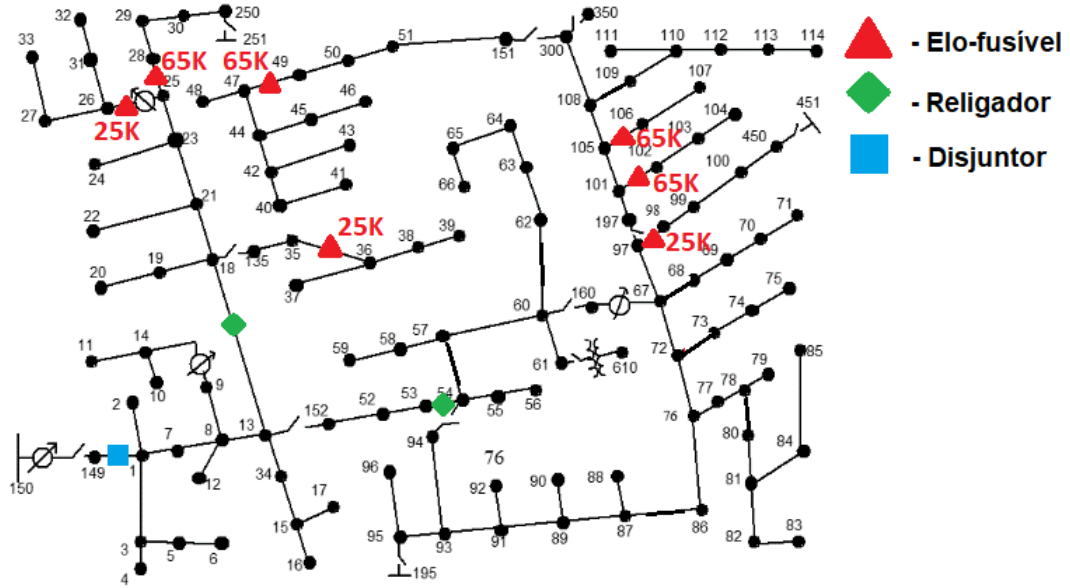
Tabela 19 – Resultados do disjuntor do segundo experimento com o sistema de 123 nós.

Nó	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	F/N	Curva	Ipickup (A)	TD	Iinst (A)
1	2.761	4.303	8.607	F	IEC-SI	586	0,23	10328
1	2.761	4.303	8.607	N	IEC-SI	415	0,26	10328

O Autor, 2022

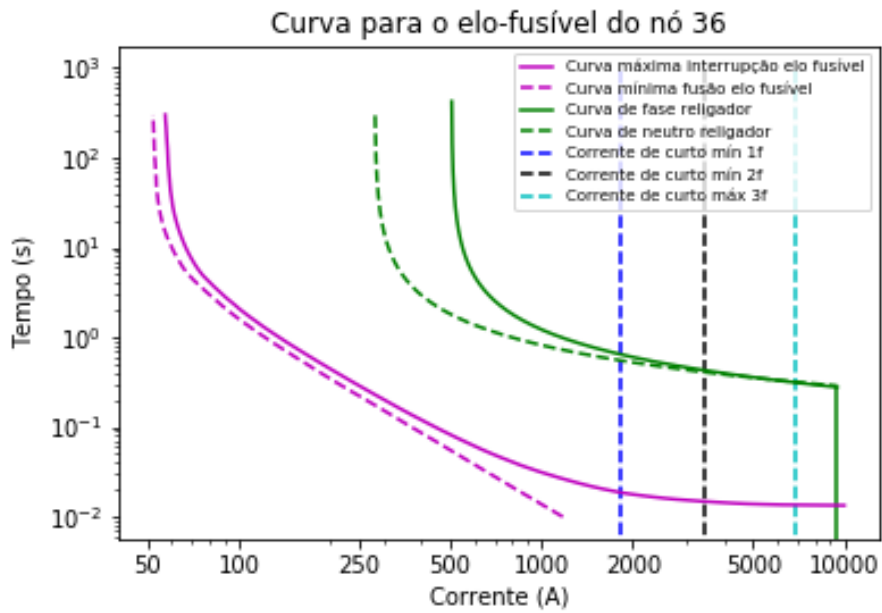
O sistema e os gráficos dos resultados são mostrados a seguir:

Figura 55 – Sistema de 123 nós após segundo experimento.



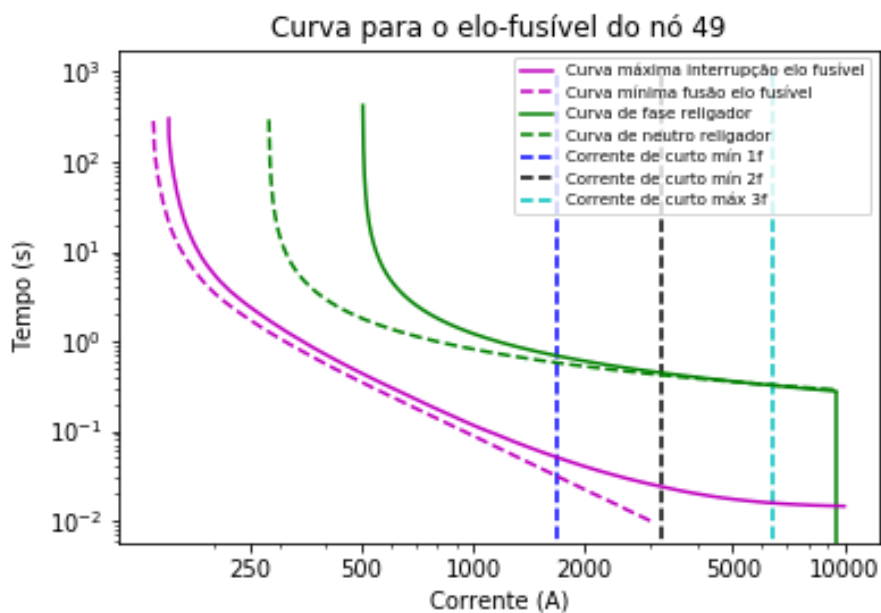
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 56 – Coordenograma do elo 36 com o religador.



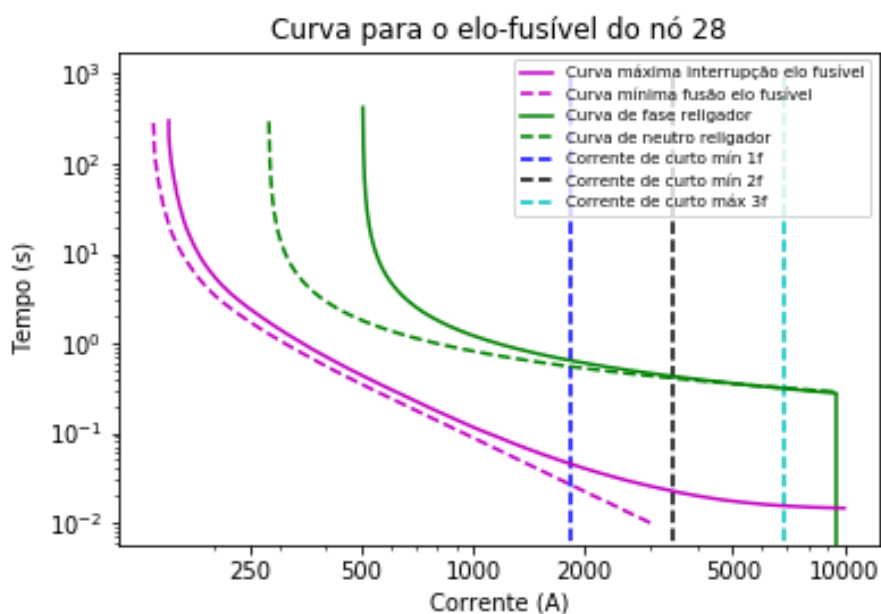
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 57 – Coordenograma do elo 49 com o religador.



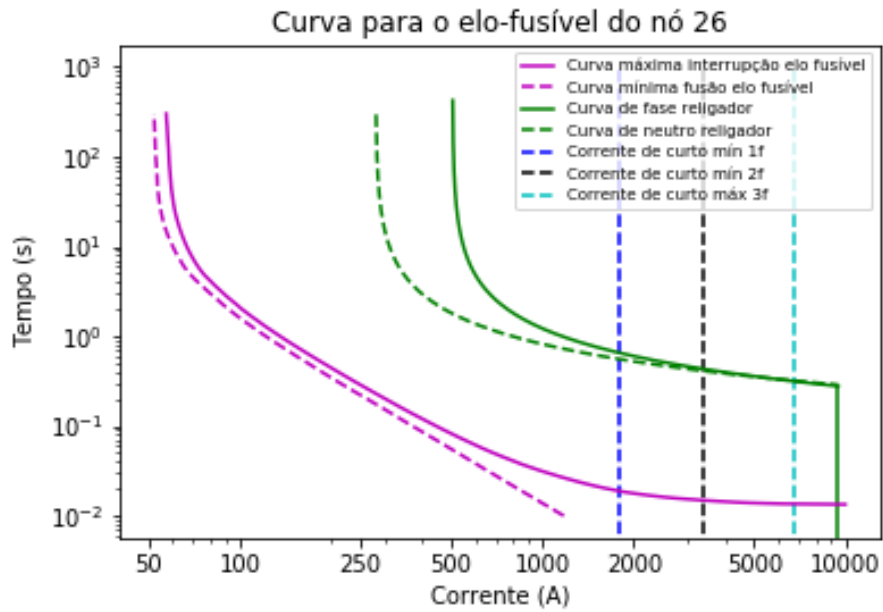
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 58 – Coordenograma do elo 28 com o religador.



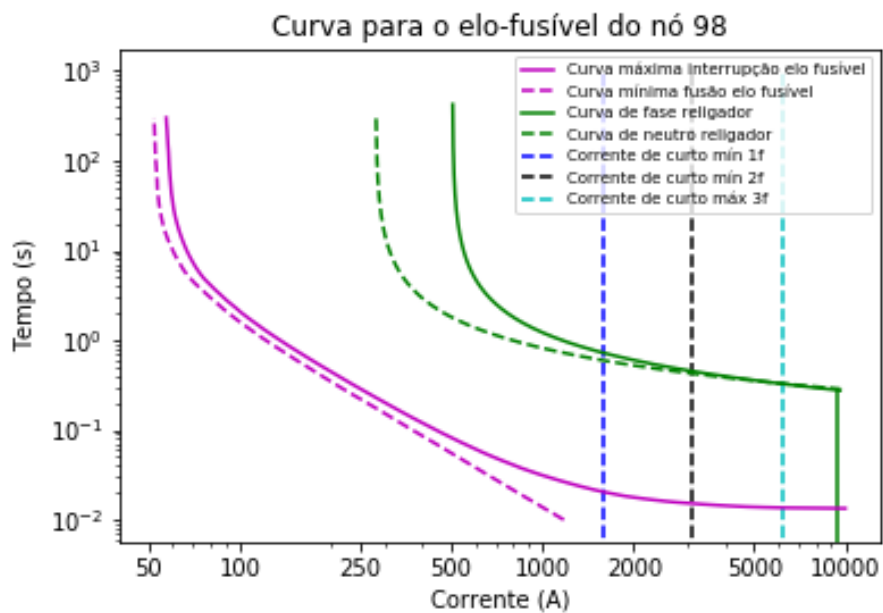
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 59 – Coordenograma do elo 26 com o religador.



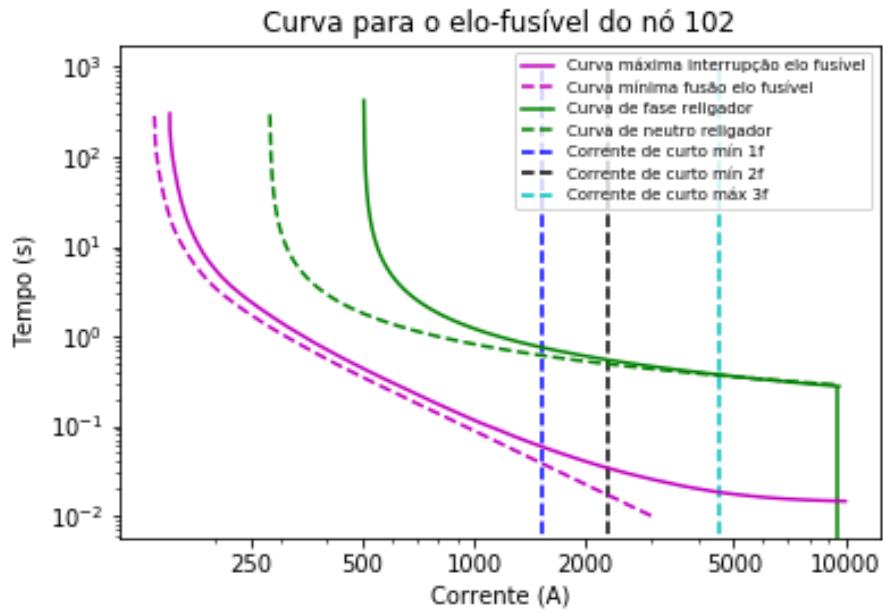
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 60 – Coordenograma do elo 98 com o religador.



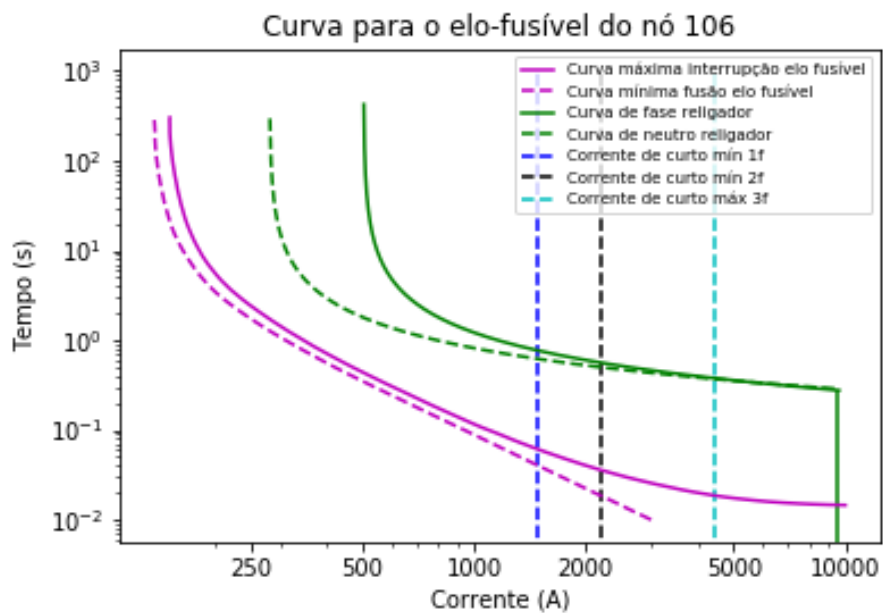
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 61 – Coordenograma do elo 102 com o religador.



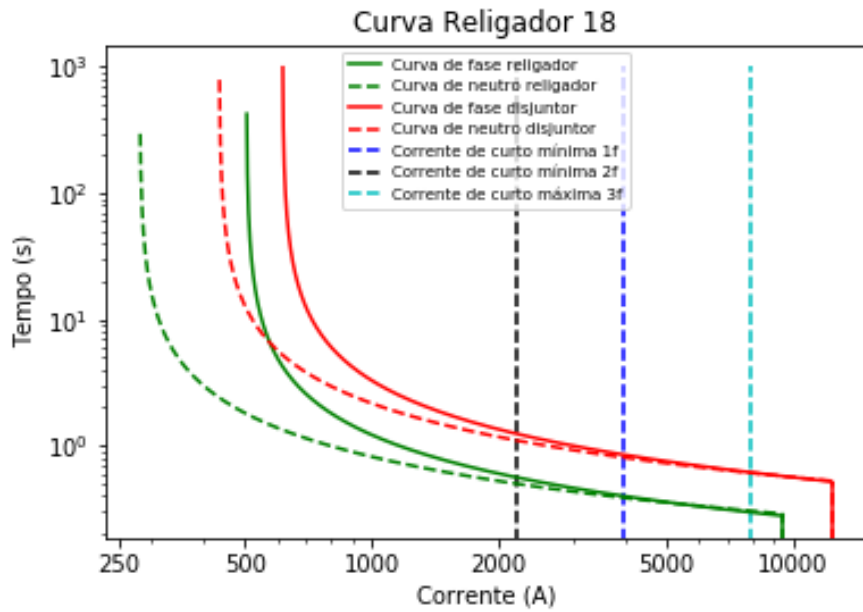
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 62 – Coordenograma do elo 106 com o religador.



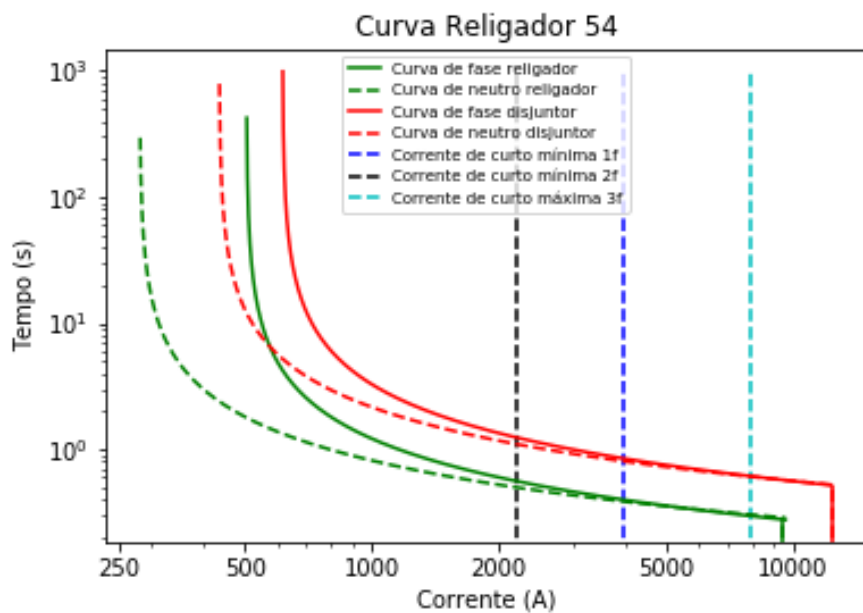
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 63 – Coordenograma do religador 18 com o disjuntor.



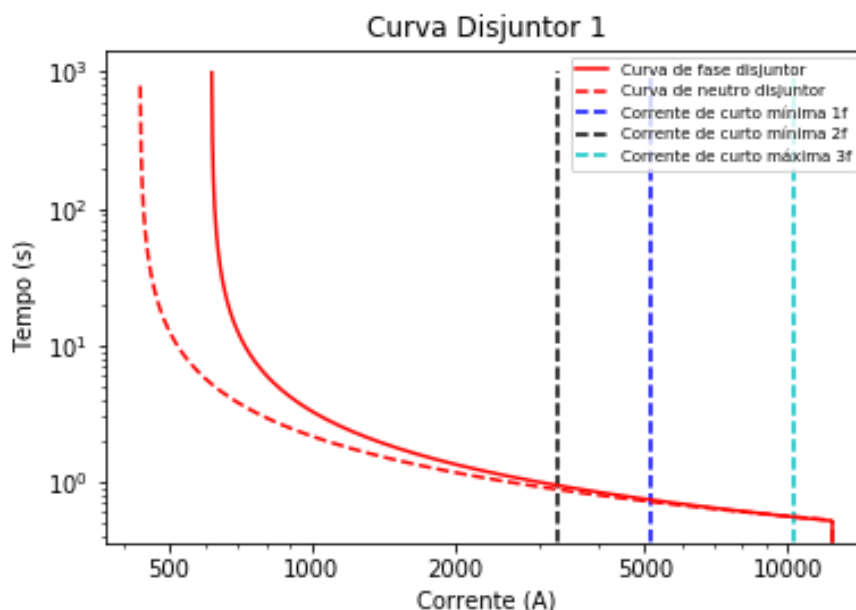
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 64 – Coordenograma do religador 54 com o disjuntor.



Fonte: O Autor, 2022.

Figura 65 – Coordenograma do disjuntor.



Fonte: O Autor, 2022.

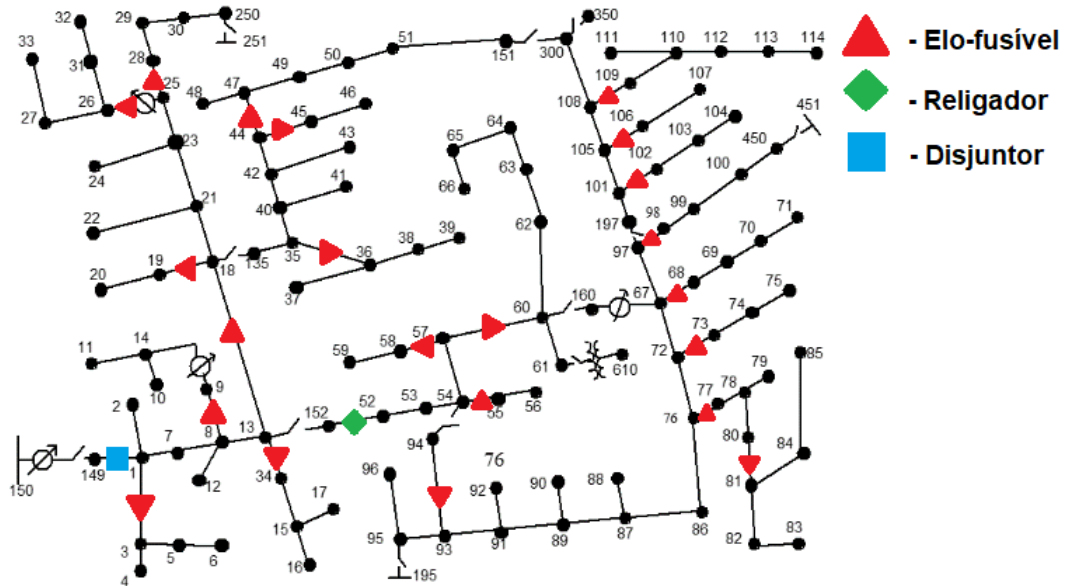
4.1.2.3 Experimento 3

Tendo em vista a falta de possibilidade de seletividade entre elos-fusíveis nos experimentos anteriores, decidiu-se por alterar valores da impedância do transformador do sistema de 123 nós, de forma a reduzir os valores das correntes, para torná-lo mais suscetível à proteção com seletividade entre elos. Executou-se o código utilizando a configuração dos dispositivos de proteção da mesma forma que no primeiro experimento, conforme itens que seguem e desenho da Figura 66:

- Elos-fusíveis nos nós: 3, 9, 34, 19, 26, 28, 45, 47, 36, 58, 55, 60, 93, 77, 73, 68, 98, 102, 106, 109, 81 e 18;
- Religador no nó 52;
- Disjuntor no nó 1 da saída da subestação.

Ao rodar o programa com esta configuração obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 20. Nesta, são apresentados os dados utilizados para o dimensionamento de cada elo-fusível no nó em que foi indicado, levando em conta a Equação 2.6. Na apresentação, I_{carga} é a corrente de carga no local do elo, I_{ccmax} é a corrente corrente de curto-circuito trifásica máxima no local do elo e I_{ccminF} é a corrente de curto-circuito monofásico mínima no final do trecho protegido pelo elo.

Figura 66 – Rede do terceiro experimento com o sistema de 123 nós.



Fonte: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, 1992 (modificado).

Tabela 20 – Resultados dos elos do terceiro experimento com o sistema de 123 nós.

Nó	Icarga (A)	Iccmax (A)	IccminF (A)	FlagIndef	Resultado
3	15,7	632	295	0	25K
9	10,3	561	260	0	15K
34	15,6	538	268	0	25K
19	7,20	439	233	0	10K
26	6,79	484	191	0	10K
28	7,21	492	200	0	10K
45	3,58	369	201	0	6K
47	36,5	474	194	1	Indef
36	7,63	494	200	0	10K
58	7,71	421	230	0	10K
55	3,86	550	253	0	6K
60	26,2	493	175	0	40K
93	37,4	368	183	1	Indef
77	14,2	427	166	0	40K
73	0,778	336	168	0	6K
68	10,5	353	171	0	15K
98	3,50	444	161	0	6K
102	0,645	329	157	0	6K
106	0,801	316	165	0	6K
109	12,1	289	135	0	25K
81	14,7	383	137	0	25K
18	62,1	564	236	1	Indef

Para a situação simulada, obteve-se três indefinições para os elos-fusíveis propostos. A justificativa é indicada pela coluna "FlagIndef", 0 indica que foi possível definir um elo, 1 indica que não foi possível por causa das características do local onde foi proposto (Icarga e IccminF) e 2 indica que não foi possível realizar a coordenação com o elo protetor.

O dimensionamento do religador e do disjuntor caracterizá-se pela definição dos seus respectivos parâmetros. Os resultados para este experimento pode ser visto na Tabela 21, para o religador, e na Tabela 22, para o disjuntor. A curva de fase de ambos deve atender as respectivas correntes de curto-circuito bifásico (Icc2) e trifásico (Icc3) nos pontos a serem instalados, da mesma forma, a curva de neutro deve atender as correntes de curto-circuito monofásico (Icc1) e trifásico (Icc3).

Tabela 21 – Resultados do religador do terceiro experimento com o sistema de 123 nós.

Nó	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	F/N	Curva	Ipickup (A)	TD	Iinst (A)
52	301	525	601	F	IEC-SI	130	0,10	893
52	301	525	601	N	IEC-SI	129	0,10	714

O Autor, 2022

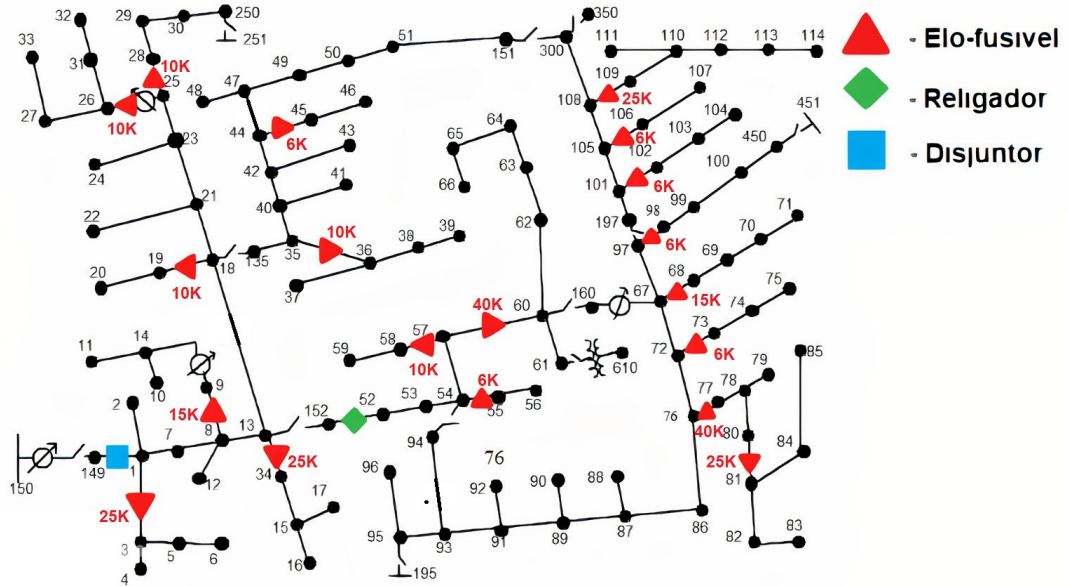
Tabela 22 – Resultados do disjuntor do terceiro experimento com o sistema de 123 nós.

Nó	Icc1 (A)	Icc2 (A)	Icc3 (A)	F/N	Curva	Ipickup (A)	TD	Iinst (A)
1	409	643	735	F	IEC-SI	170	0,14	727
1	409	643	735	N	IEC-SI	171	0,14	727

O Autor, 2022

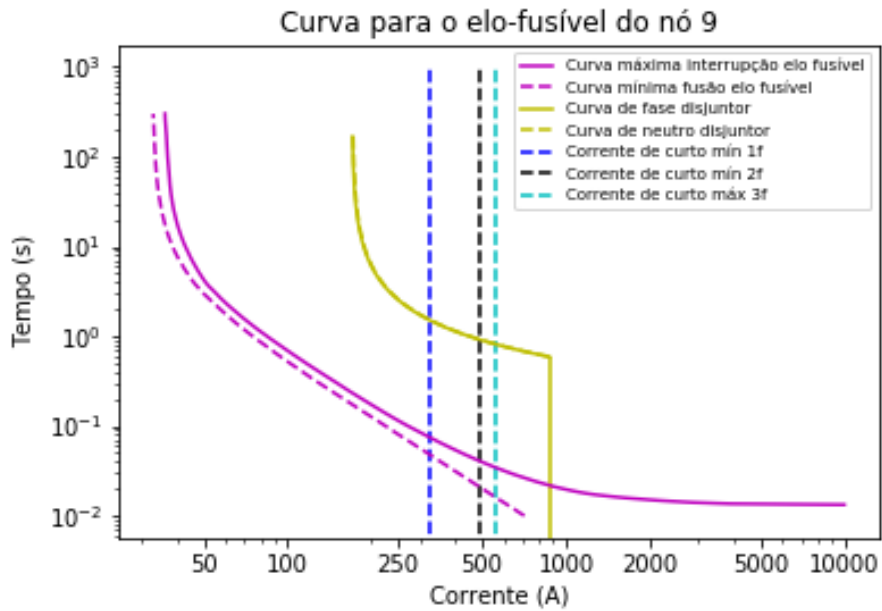
O sistema e os gráficos dos resultados são mostrados a seguir:

Figura 67 – Sistema de 123 nós após terceiro experimento.



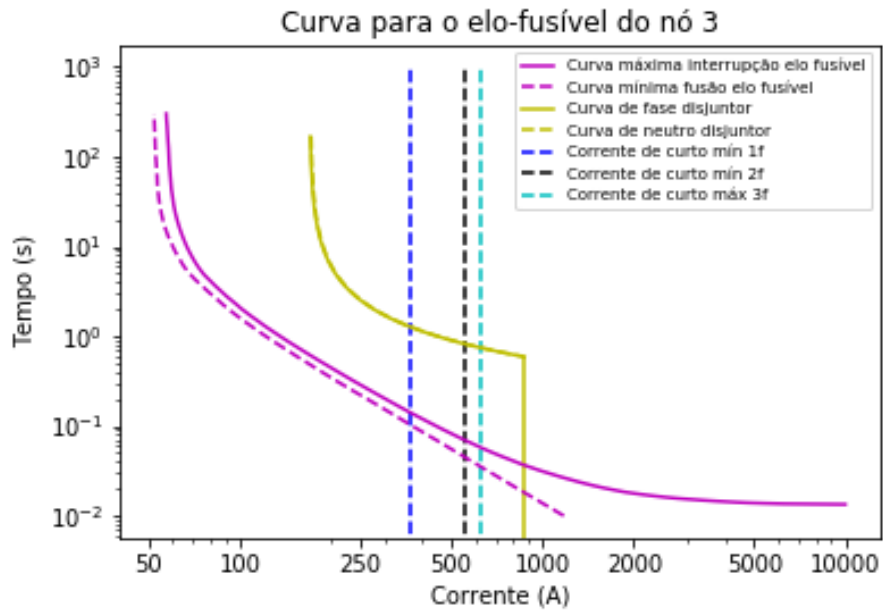
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 69 – Coordenograma do elo 9 com o disjuntor.



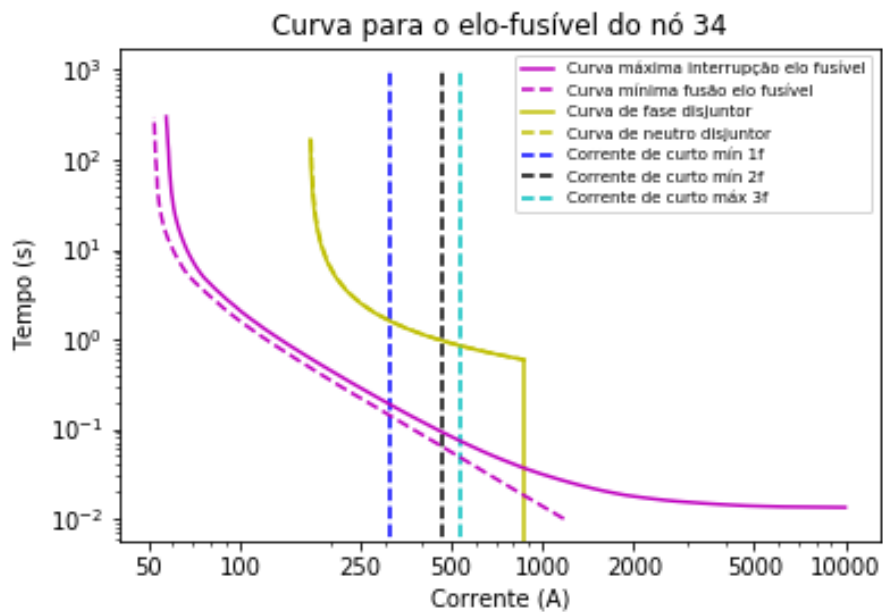
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 68 – Coordenograma do elo 3 com o disjuntor.



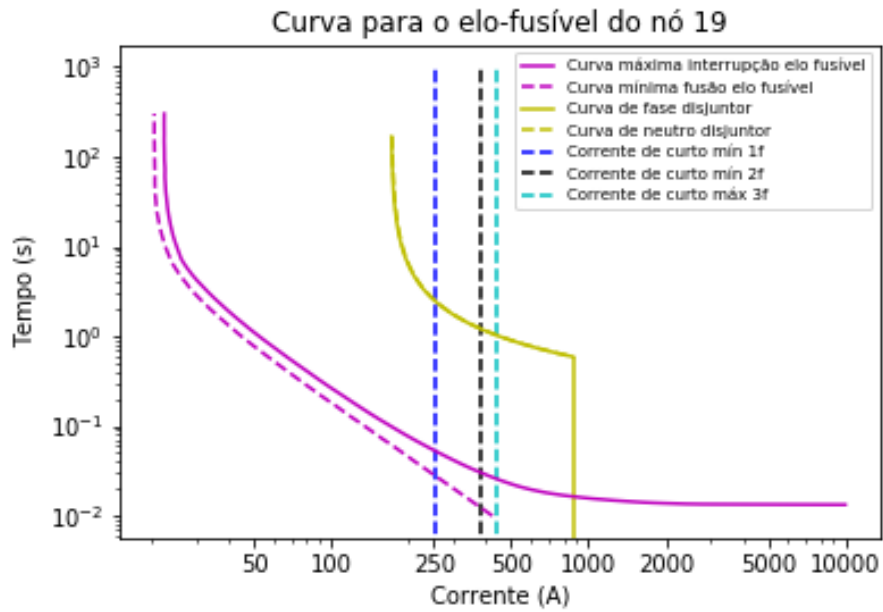
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 70 – Coordenograma do elo 34 com o disjuntor.



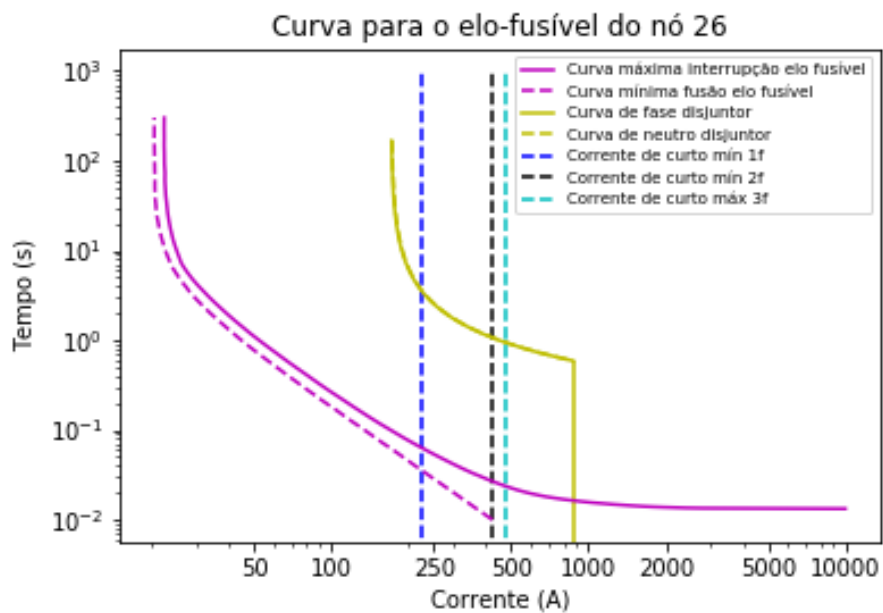
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 71 – Coordenograma do elo 19 com o disjuntor.



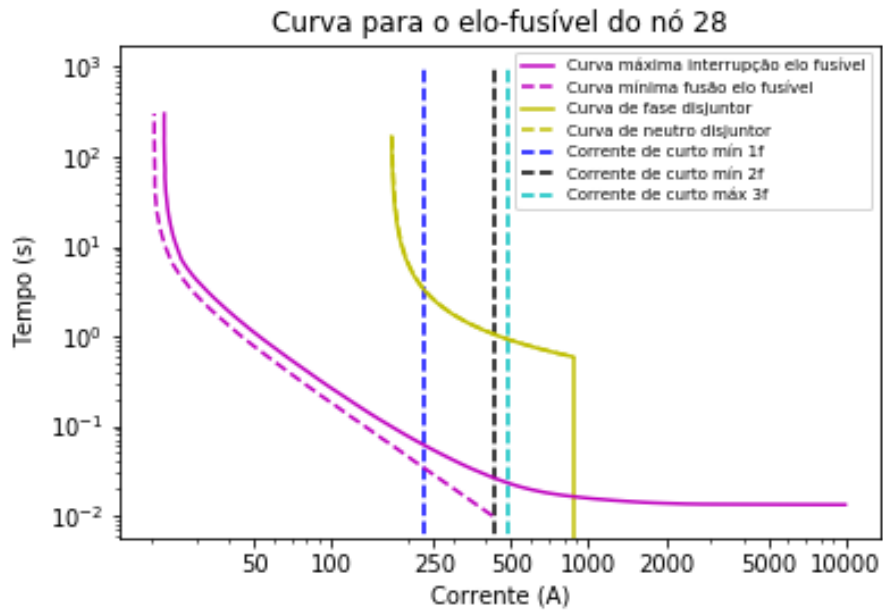
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 72 – Coordenograma do elo 26 com o disjuntor.



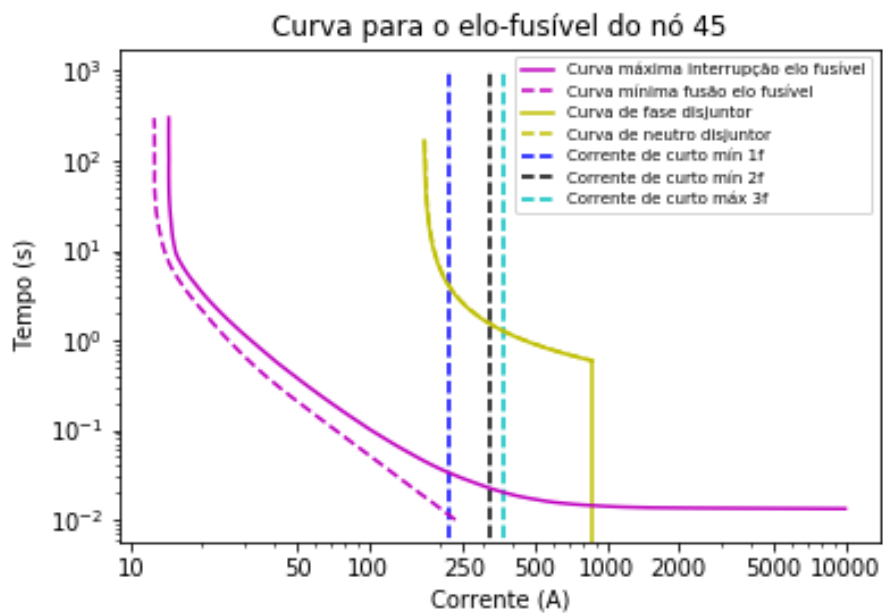
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 73 – Coordenograma do elo 28 com o disjuntor.



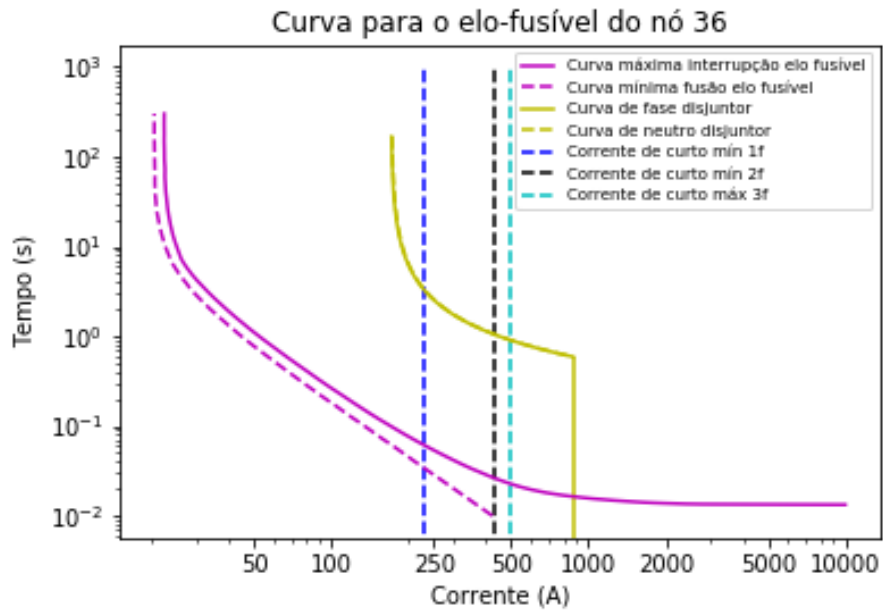
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 74 – Coordenograma do elo 45 com o disjuntor.



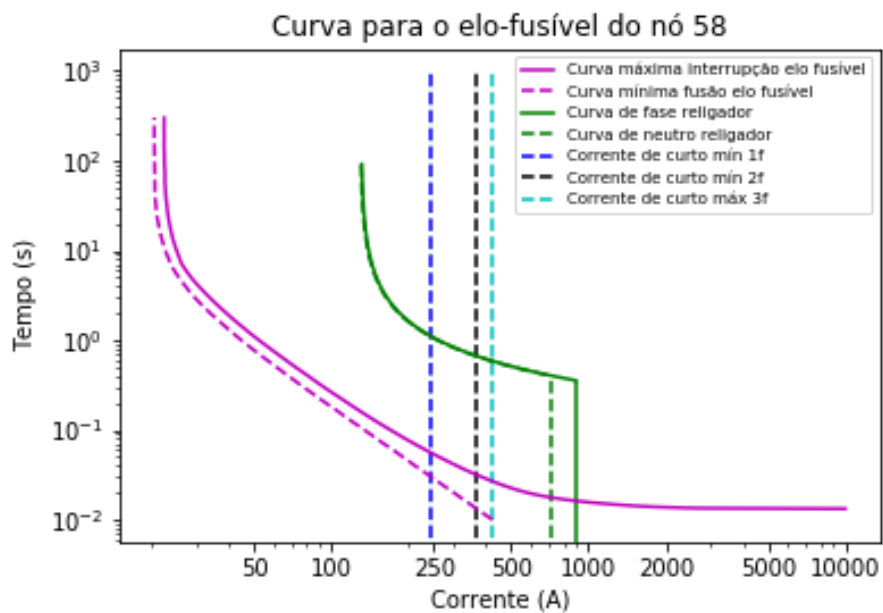
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 75 – Coordenograma do elo 36 com o disjuntor.



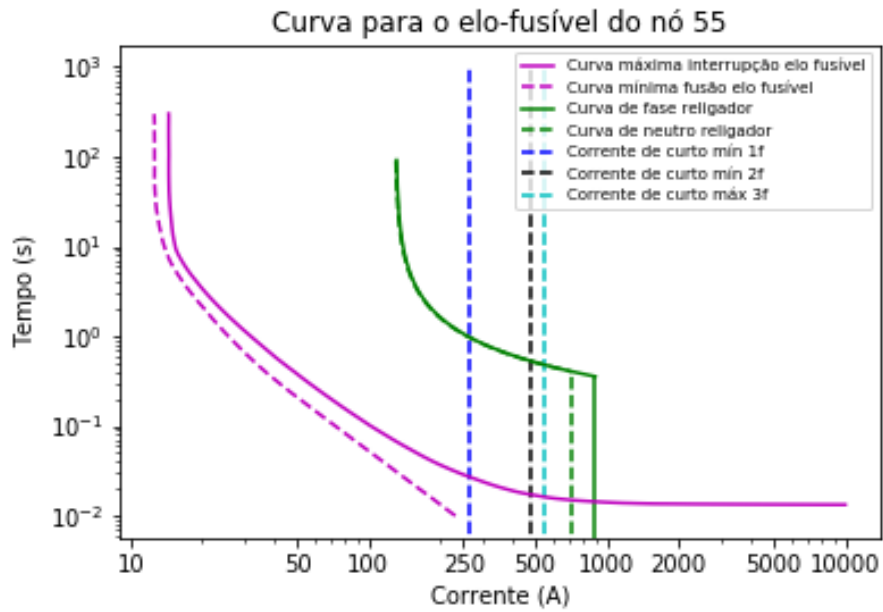
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 76 – Coordenograma do elo 58 com o religador.



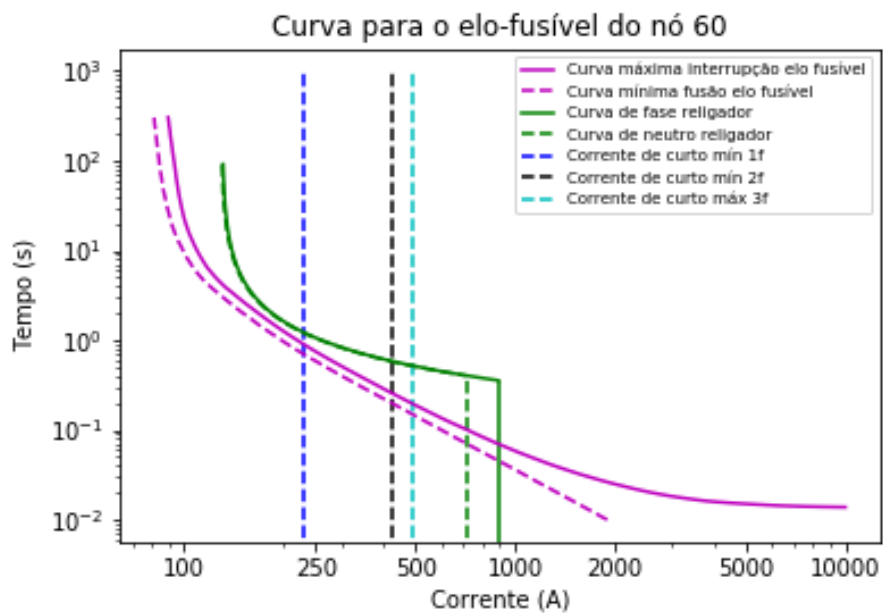
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 77 – Coordenograma do elo 55 com o religador.



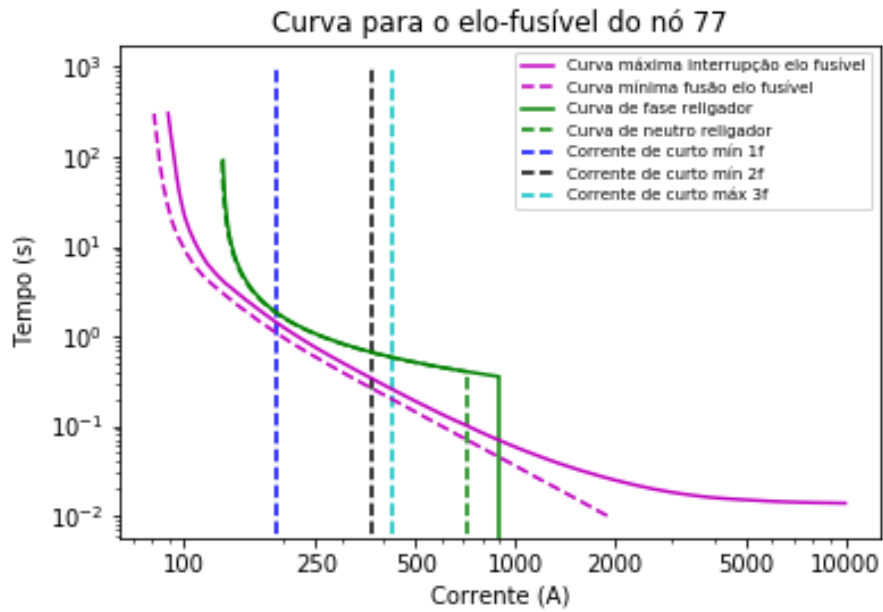
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 78 – Coordenograma do elo 60 com o religador.



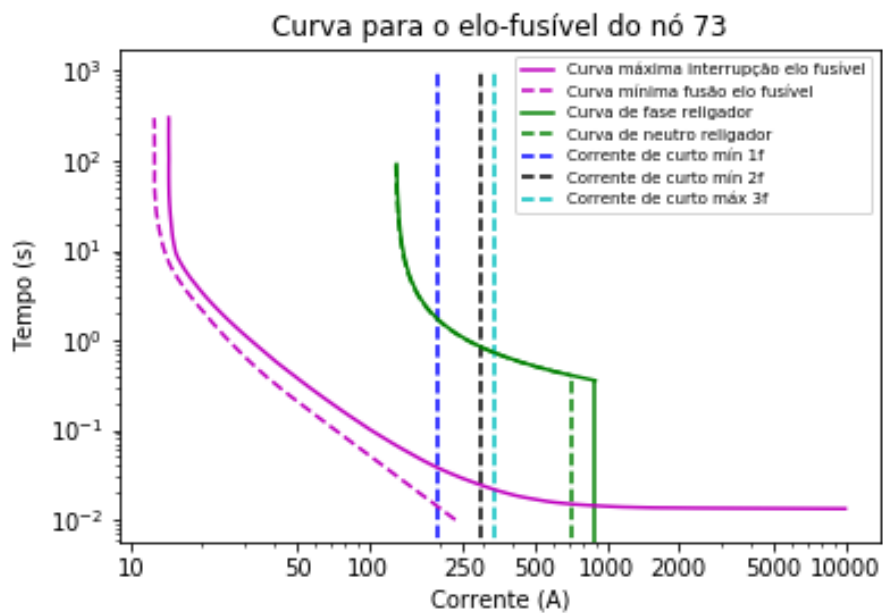
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 79 – Coordenograma do elo 77 com o religador.



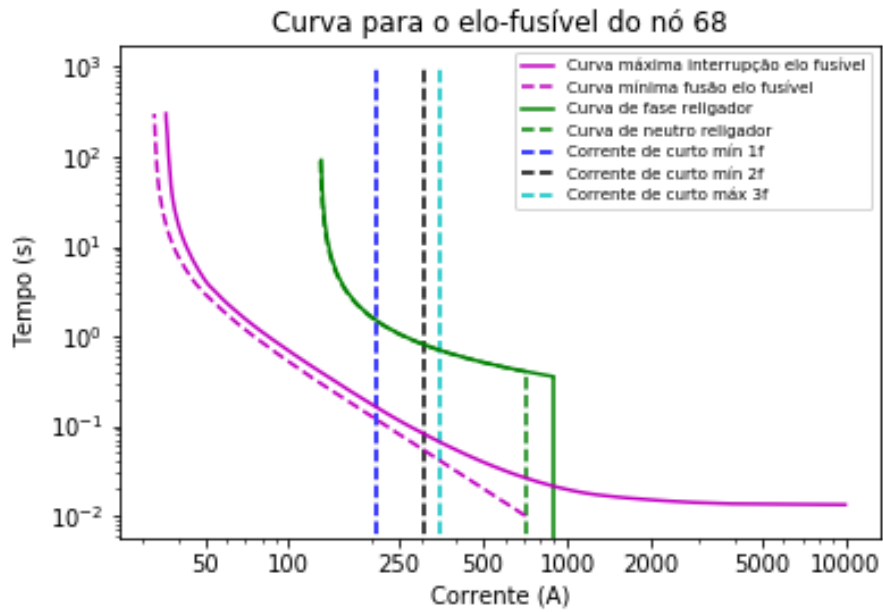
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 80 – Coordenograma do elo 73 com o religador.



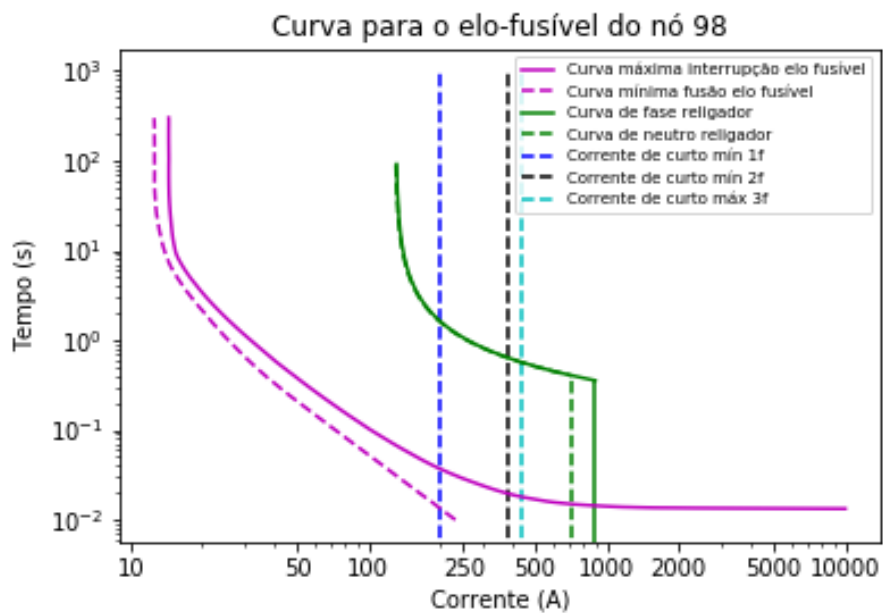
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 81 – Coordenograma do elo 68 com o religador.



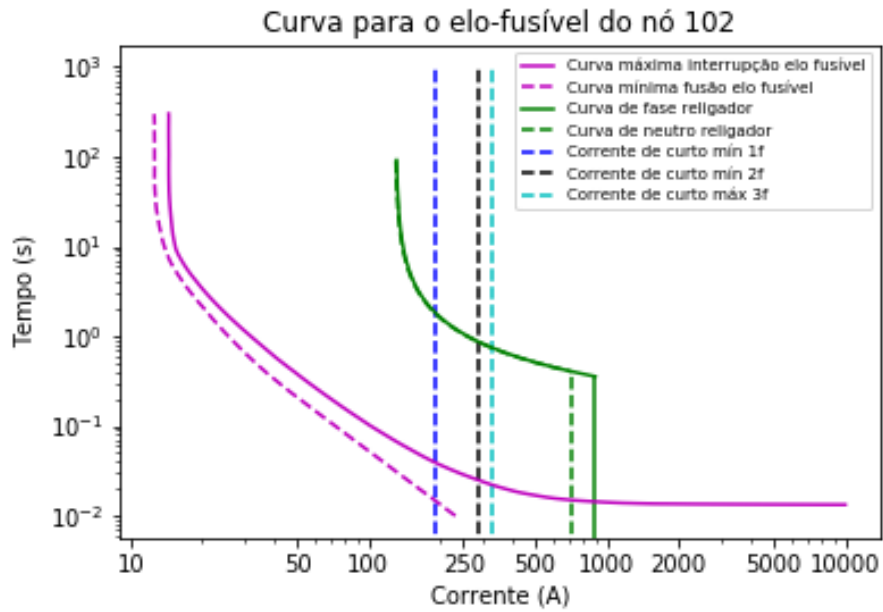
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 82 – Coordenograma do elo 98 com o religador.



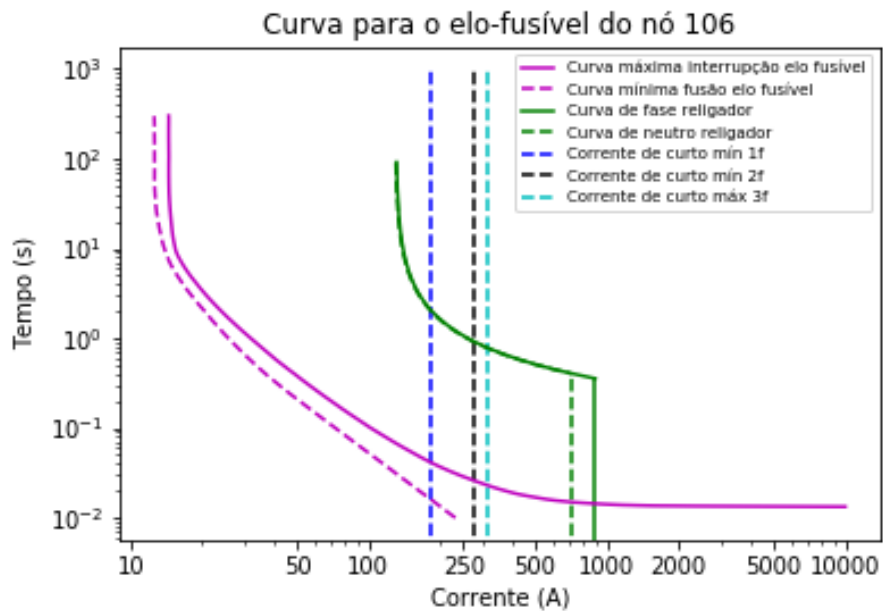
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 83 – Coordenograma do elo 102 com o religador.



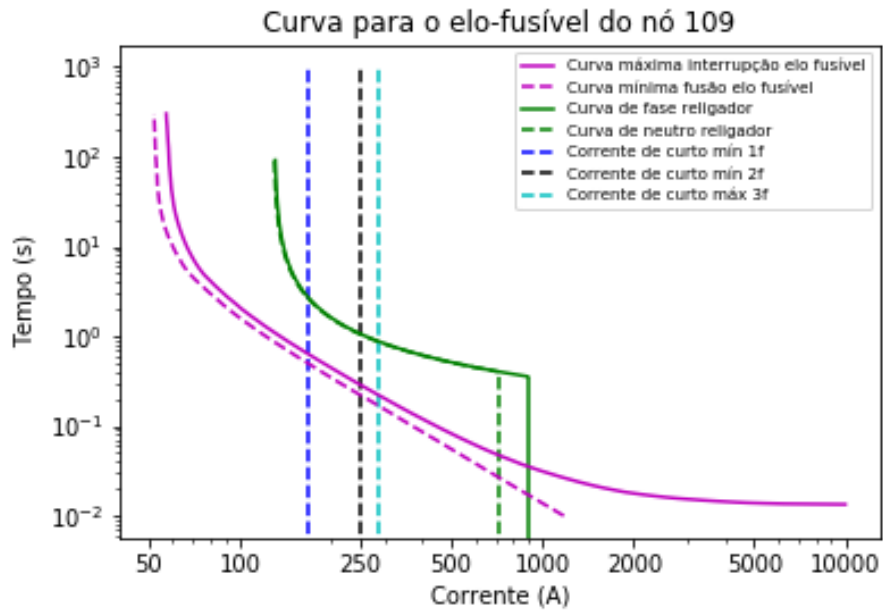
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 84 – Coordenograma do elo 106 com o religador.



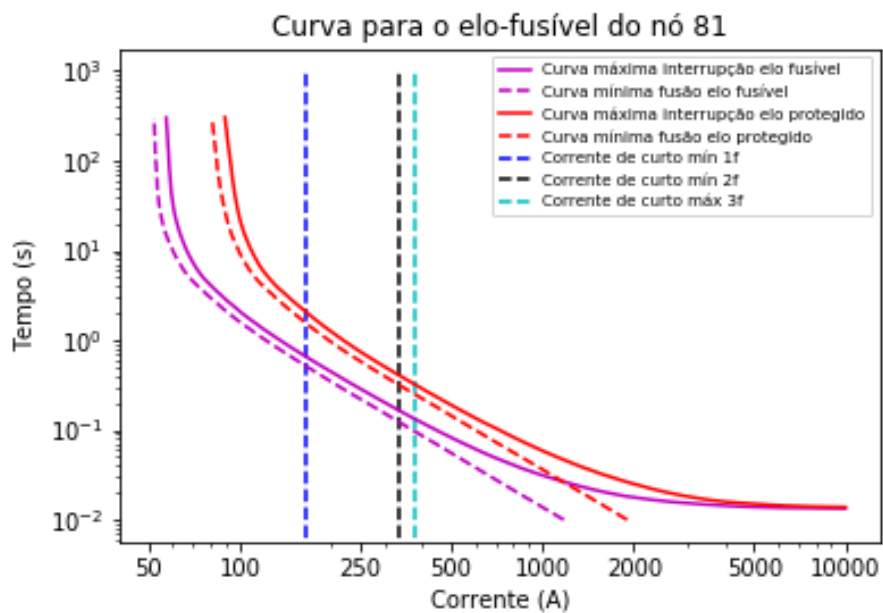
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 85 – Coordenograma do elo 109 com o religador.



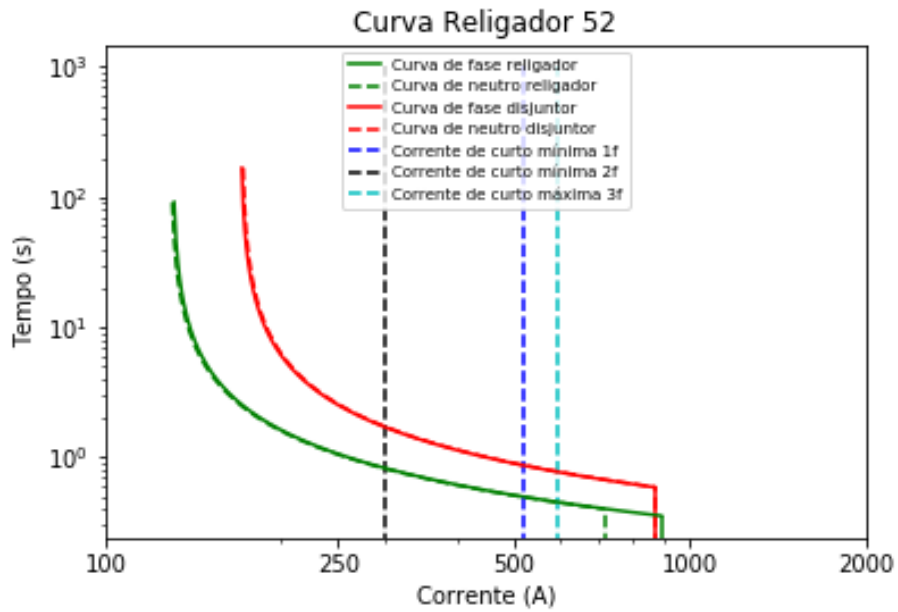
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 86 – Coordenograma do elo 81 com o elo 77.



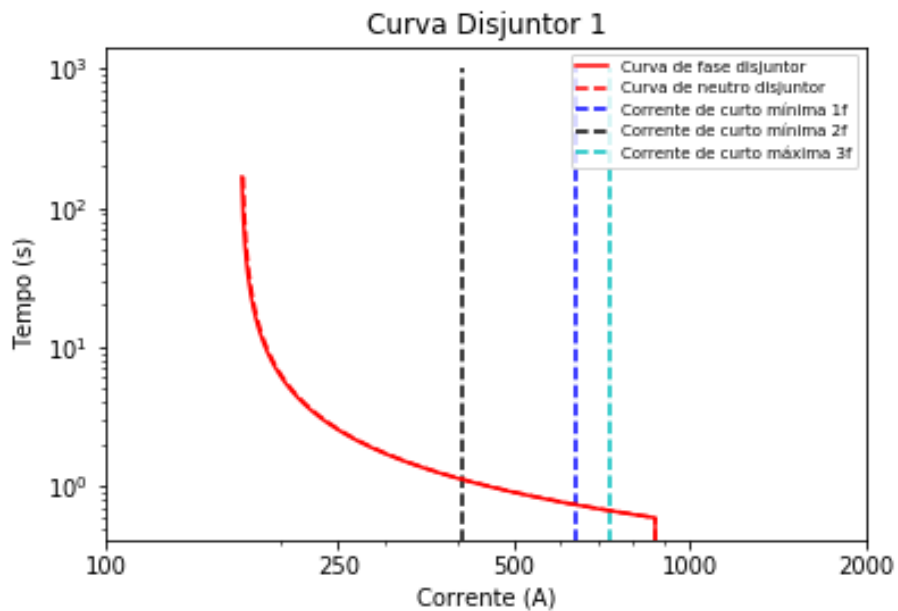
Fonte: O Autor, 2022.

Figura 87 – Coordenograma do religador com o disjuntor.



Fonte: O Autor, 2022.

Figura 88 – Coordenograma do disjuntor.



Fonte: O Autor, 2022.

5 Conclusão

O objetivo principal deste trabalho consistiu em desenvolver um algoritmo em Python que dimensionasse os dispositivos de proteção, em locais definidos pelo usuário, a partir de uma rede de distribuição modelada no *software* OpenDSS. Esperava-se, ao fim do trabalho, obter uma ferramenta, integrada com o OpenDSS, que poderia ser utilizada em estudos simples de proteção e que poderia dar origem a uma ferramenta mais robusta com a continuidade do projeto.

Ao final, o algoritmo desenvolvido foi capaz de dimensionar elos-fusíveis, religadores e disjuntor para uma rede radial de distribuição levando em conta os limites de definição de elos baseados nos valores de corrente de carga e corrente de curto-circuito mínima no ramo protegido, os valores de curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos nos locais de cada dispositivo de proteção, e a coordenação entre dispositivos no mesmo ramo para que apenas o mais próximo do defeito atue. Todas as informações de corrente e os resultados dimensionados são mostrados, ao fim, em um arquivo de texto e os coordenogramas dos dispositivos são mostrados em figuras criadas pelo programa.

Os dispositivos de proteção foram dimensionados e coordenados conforme o esperado, produzindo resultados satisfatórios e corretos, conforme foi comprovado nos cálculos dos experimentos com o sistema de 34 nós. Porém, para validar o algoritmo de seletividade entre elos-fusíveis, realizou-se um teste no sistema de 123 barras com o valor de impedância do transformador de subestação aumentado. Neste experimento, observa-se que foram possíveis relações de seletividade entre os elos-fusíveis, demonstrando a funcionalidade do algoritmo para este objetivo.

Com o desenvolvimento deste algoritmo pretende-se dar início a uma ferramenta acessível que consiga eficientemente simular e resolver informações com foco em proteção de redes de distribuição de energia. Desta forma, será possível atender a demandas de projetos de proteção de redes elétricas sem que sejam necessários elevados recursos financeiros ou muitas horas de aprendizado a respeito do software. Para dar continuidade a este projeto, há a possibilidade de adicionar mais robustez ao algoritmo, levando em conta mais dados do sistema, como dados da proteção da subestação, de transformadores e de cabeamento, bem como buscar uma maior otimização computacional dos processos realizados. Além disso, é possível o desenvolvimento de um produto, de forma privada, com uma interface de usuário, que realize todo o dimensionamento da proteção de uma dada rede de distribuição.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Procedimentos de Regulação Tarifária: Submódulo 9.2 - REVISÃO PERIÓDICA DAS RECEITAS DAS CONCESSIONÁRIAS LICITADAS**, Brasília, 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Resolução Normativa nº 956**, de 7 de dezembro de 2021, Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2021.
- ANDERSON, Paul, **Analysis of faulted power systems**, 1ª Edição, Nova Iorque: IEEE Press Power Systems Engineering Series, 1995.
- BRITO, Núbia, *et. al.*, **Proposição do uso de softwares de simulação em proteção de sistemas elétricos**, In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, nº 40, 2012, Belém, 2012.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA, **Elos fusíveis de distribuição**, Florianópolis, 2018.
- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ, **Proteção de redes aéreas de distribuição - sobrecorrente**, São Paulo, 2016.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Consumo de energia elétrica na rede.**, 2022.
- GERS, Juan; HOLMES, Edward, **Protection od Electricity Distribution Networks**, 2ª Edição, Bodmin: Mpg Books, 2004.
- KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos; ROBBA, Ernesto, **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**, 2ª Edição, São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- LEMOS, Flávio, **Aula 17 Proteção de Sistemas de Distribuição - I; Aula 18 Proteção de Sistemas de Distribuição - II; Aula 19 Proteção de Sistemas de Distribuição - III.**, DELAE - UFRGS, Porto Alegre, 2020.
- MAMEDE, João; MAMEDE, Daniel, **Proteção de sistemas elétricos de potência**, 2ª Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- MOHAN, Ned, **Sistemas elétricos de potência - curso introdutório**, 1ª Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- SATO, Fujito; FREITAS, Walmir, **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica**, 1ª Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2014.

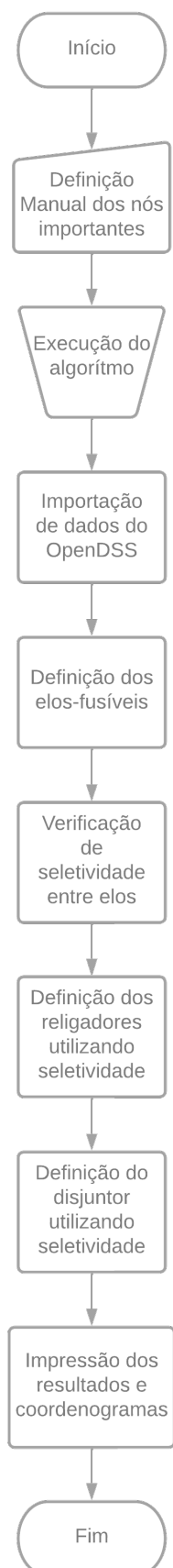
STEVENSON, William, **Elementos de análise de sistemas de potência**, 2^a Edição, São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

VARGAS, Werner, **Ferramenta para dimensionamento automatizado de dispositivos de proteção em redes de distribuição através de simulação e estrutura em árvore.**, 2020, Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Porto Alegre, 2020.

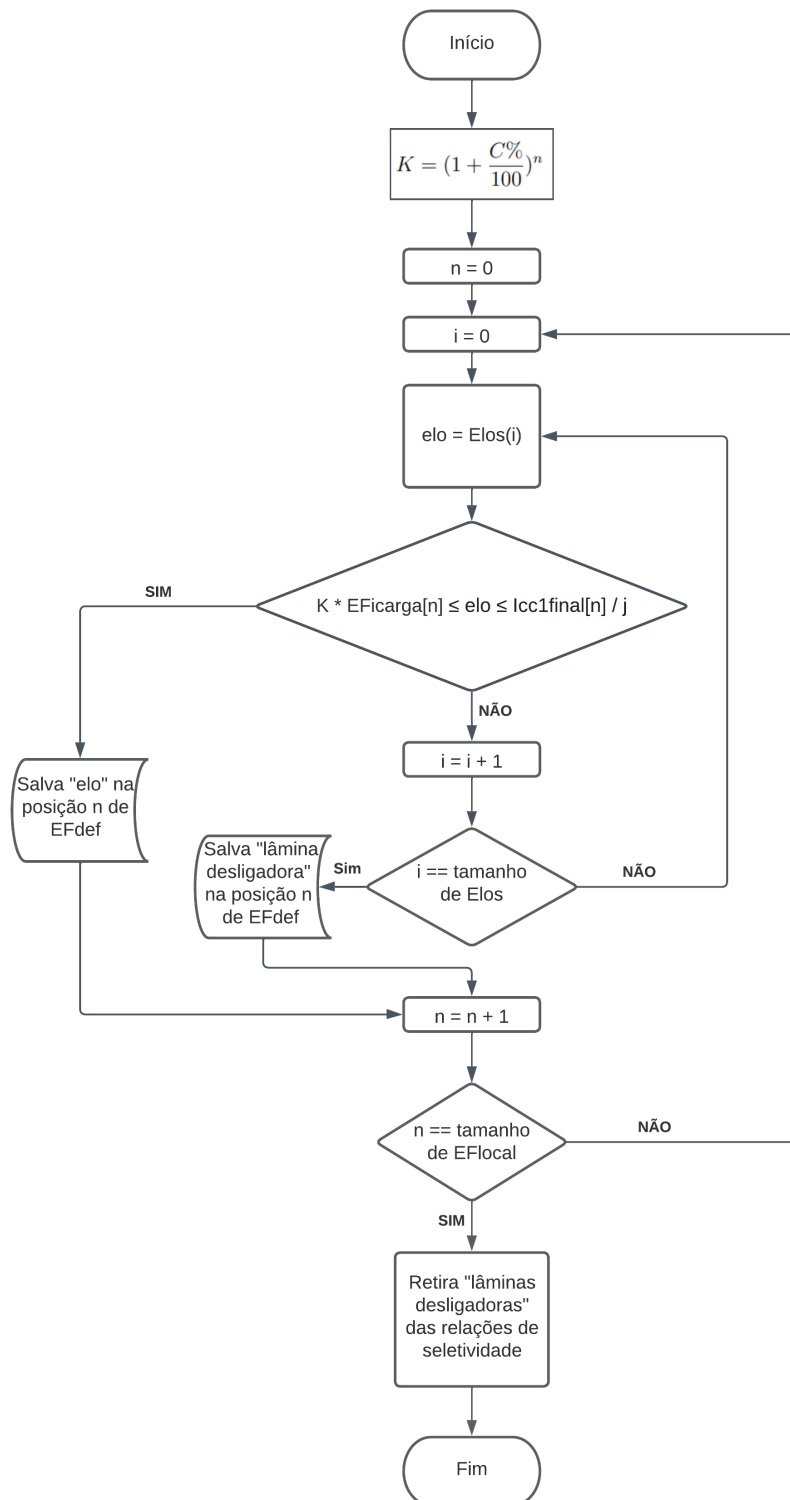
ZANETTA, Luiz, **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**, 1^a Edição, São Paulo: Livraria da Física, 2006.

Anexos

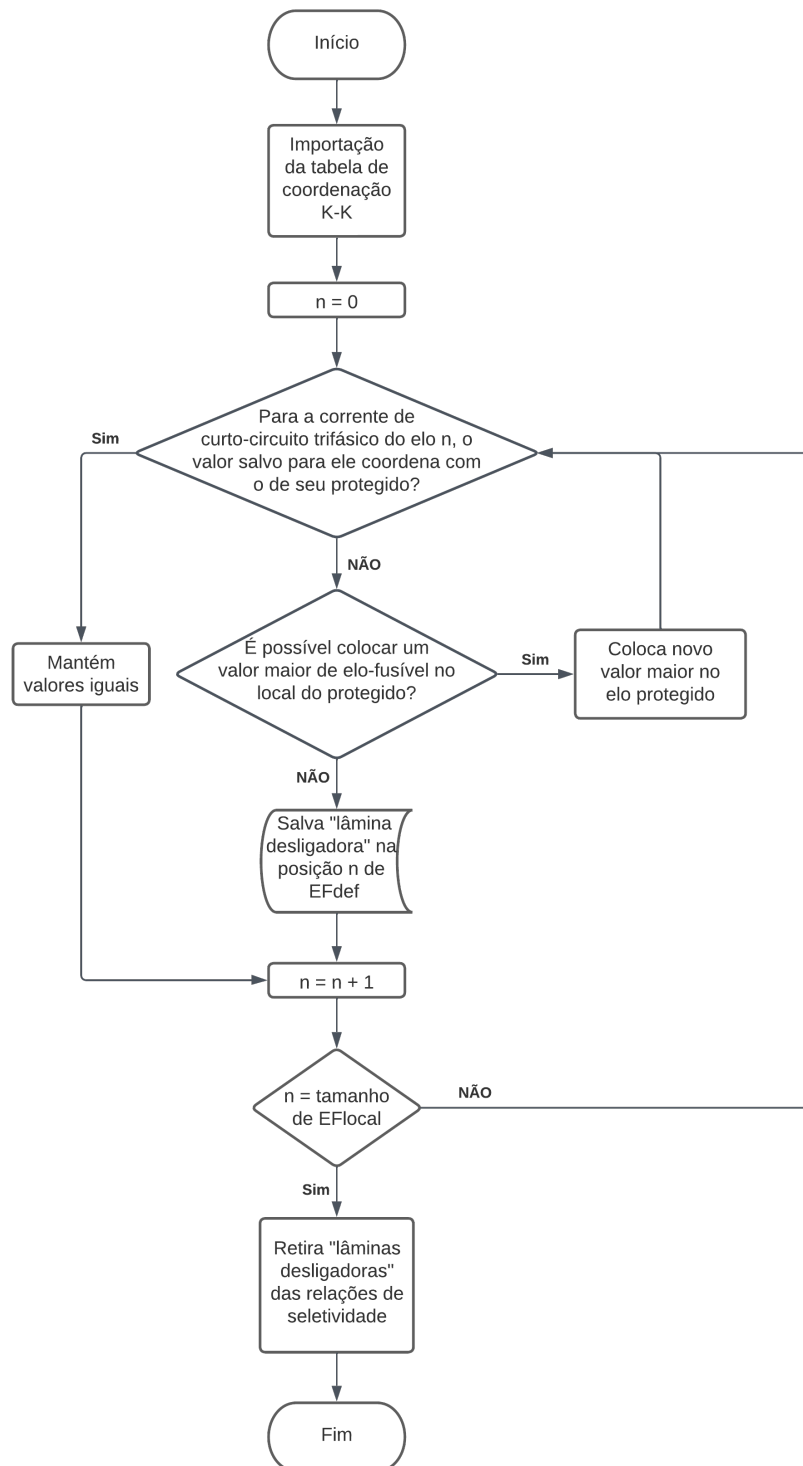
ANEXO A – Macrofluxo do algoritmo.



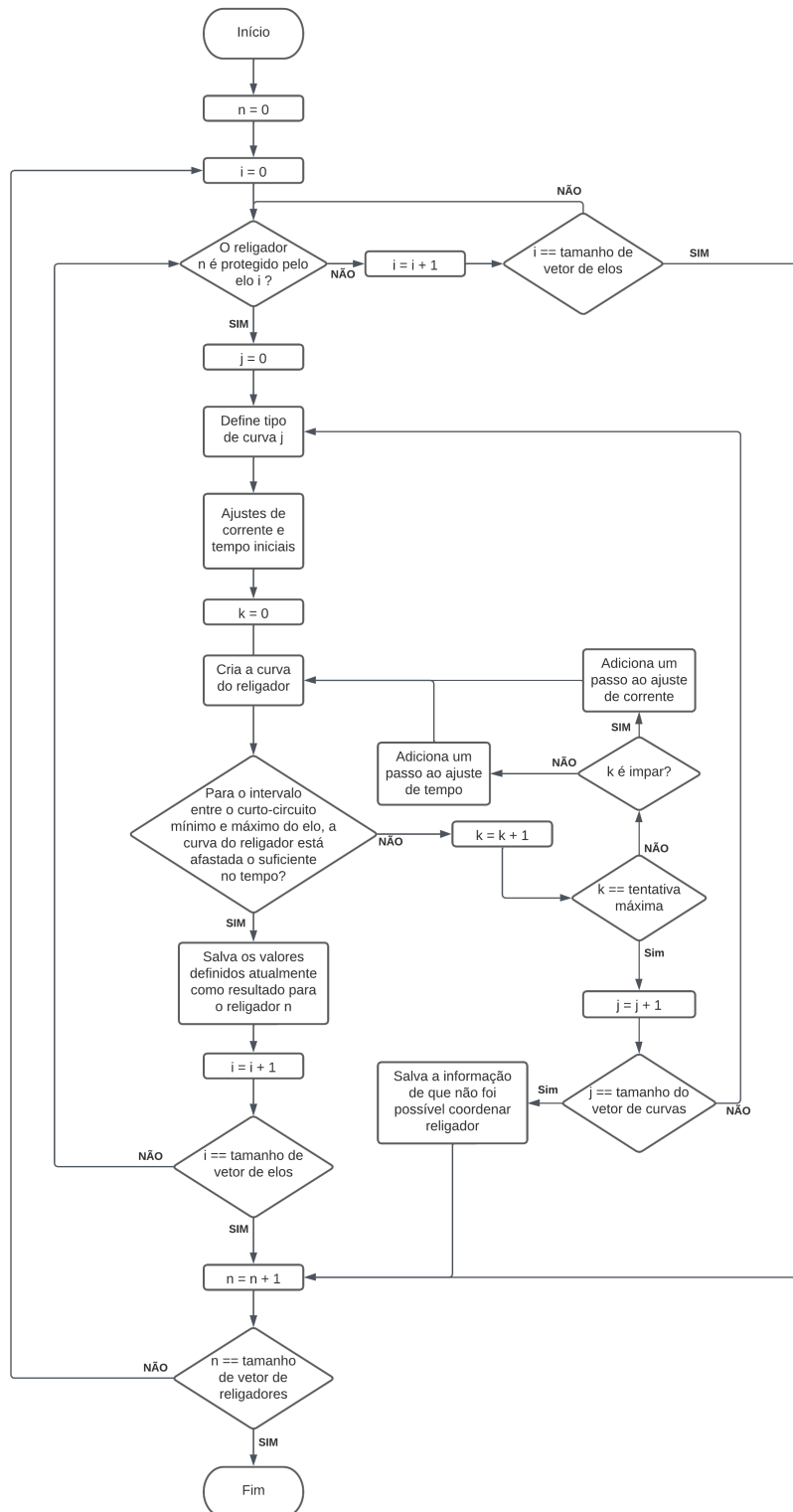
ANEXO B – Fluxograma de definição dos elos-fusíveis



ANEXO C – Fluxograma de seletividade entre elos.



ANEXO D – Fluxograma de seletividade do religador.



ANEXO E – Fluxograma de seletividade do disjuntor.

