

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Guilherme Shinji Nakamine

**Desenvolvimento de uma Ferramenta para a
Parametrização de Religadores em Sistemas de
Distribuição de Energia Elétrica.**

São Carlos

2019

Guilherme Shinji Nakamine

**Desenvolvimento de uma Ferramenta para a
Parametrização de Religadores em Sistemas de
Distribuição de Energia Elétrica.**

Monografia apresentada ao Curso de Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Benvindo Rodrigues Pereira Junior

**São Carlos
2019**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

N163d Nakamine, Guilherme Shinji
Desenvolvimento de uma Ferramenta para a
Parametrização de Religadores em Sistemas de
Distribuição de Energia Elétrica / Guilherme Shinji
Nakamine; orientador Benvindo Rodrigues Pereira Junior.
São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2019.

1. Religador. 2. Sistema de distribuição. 3.
Algoritmo genético. 4. Otimização. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Guilherme Shinji Nakamine

Título: "Desenvolvimento de uma ferramenta para a parametrização de relígadores em sistemas de distribuição de energia elétrica"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 22 / 11 / 2019,

com NOTA 9,0 (Nove, Fero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Benvindo Rodrigues Pereira Junior - Orientador -
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Guilherme Guimarães Lage - UFSCar

Mestre Júlio Augusto Druzina Massignan - Doutorando -
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais Fukushi e Sueli e ao meu irmão Arthur que me apoiaram não só em toda a minha graduação, como também em todos os momentos da minha vida. Sem esquecer também de todos os membros da família Nakamine e Hara que me deram suporte em diversos momentos também.

Meus agradecimentos ao professor Benvindo Rodrigues Pereira Junior que me orientou com muita atenção e dedicação desde o início. Sempre foi muito solícito, sanou todas as dúvidas que tive e sempre indicou qual o melhor caminho a ser seguido.

A todos os meus amigos com quem compartilhei tanto momentos felizes, quanto difíceis. Em especial àqueles que conheci na universidade, com quem passei muitas noites sem dormir estudando para agora, após muito esforço e dedicação, sermos recompensados no final com o tão sonhado diploma.

Aos colegas do LASEE que me ajudaram na realização desse trabalho de conclusão de curso sanando diversas dúvidas que tive.

Por fim, sou muito grato à Universidade de São Paulo por me proporcionar infraestrutura e oportunidades para uma boa formação acadêmica. Gostaria de agradecer principalmente aos professores que ensinaram um pouco do grande conhecimento que possuem para que pudéssemos nos tornar grandes profissionais.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Revisão Bibliográfica	16
1.2	Objetivo e motivação	19
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
2.1	Religadores	21
2.1.1	Características	22
2.2	Fusíveis	23
2.3	Coordenação e Seletividade	25
2.3.1	Coordenação fusível-religador	26
2.3.2	Coordenação relé-religador	27
2.4	Indicadores DEC e FEC	28
2.5	Algoritmo Genético	30
3	METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO	33
4	RESULTADOS DO TRABALHO	41
4.1	Simulação 1	42
4.2	Simulação 2	47
5	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Religador e seu sistema de controle	21
Figura 2 – Fusível	24
Figura 3 – Curvas dos Fusíveis Tipo T	24
Figura 4 – Coordenação entre fusível e religador	26
Figura 5 – Seletividade entre fusível e religador	26
Figura 6 – Coordenação relé-religador	28
Figura 7 – Exemplo de crossover	31
Figura 8 – Exemplo de mutação	32
Figura 9 – Indivíduo do Algoritmo Genético	33
Figura 10 – Exemplo de penalização	36
Figura 11 – Exemplo matriz de curto-circuito	37
Figura 12 – Exemplo configuração nós e ramos de uma região do sistema	37
Figura 13 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido	38
Figura 14 – Sistema Real de 135 Barras	41
Figura 15 – Sistema Real de 135 Barras com os Dispositivos de Proteção	42
Figura 16 – Curvas Neutro Religador 78 e Fusível 89 - Simulação 1	45
Figura 17 – Curvas Fase Religador 78 e Fusível 89 - Simulação 1	45
Figura 18 – Curvas Neutro Religador 1 e Religador 78 - Simulação 1	46
Figura 19 – Curvas Fase Religador 1 e Religador 78 - Simulação 1	46
Figura 20 – Curva de convergência - Simulação 1	47
Figura 21 – Curvas Neutro Religador 78 e Fusível 89 - Simulação 2	49
Figura 22 – Curvas Fase Religador 78 e Fusível 89 - Simulação 2	49
Figura 23 – Curvas Neutro Religador 1 e Religador 78 - Simulação 2	50
Figura 24 – Curvas Fase Religador 1 e Religador 78 - Simulação 2	50
Figura 25 – Curva de convergência - Simulação 2	51

RESUMO

Nakamine, G. S. **Desenvolvimento de uma Ferramenta para a Parametrização de Religadores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica..** 2019. 56p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Os índices de continuidade definidos pelos órgãos reguladores de energia elétrica estão cada vez mais desafiadores. Para proporcionar satisfação e segurança para os consumidores, esses indicadores visam reduzir a duração e frequência das interrupções de energia elétrica causadas por curto-circuitos no sistema. As distribuidoras têm investido em novas tecnologias e metodologias para evitar essas rigorosas penalizações e, nesse contexto, muitas ferramentas computacionais podem ser utilizadas para minimizar essas perdas. Um equipamento muito utilizado para minimização dos impactos dos curto-circuitos são os religadores, uma vez que estes possuem capacidade de religamento automático evitando em muitos casos a queima de elos dos fusíveis. Entretanto a correta operação do religador está sujeita a um certo número de ajustes. Neste contexto, este trabalho de conclusão de curso propõe o desenvolvimento de uma ferramenta para a definição dos ajustes dos religadores instalados no sistema de distribuição. A ferramenta desenvolvida para parametrização de religadores em sistemas de distribuição, é baseada em algoritmos genéticos onde serão observadas os tempos de coordenação e seletividade entre os equipamentos de proteção e a área isolada por cada um deles na ocorrência de uma falta no sistema. O resultado final define a melhor configuração dos parâmetros ajustáveis dos religadores visando minimizar os tempos de atuação de todos os equipamentos do sistema elétrico de distribuição garantindo a coordenação e seletividade com o maior número de dispositivos possível. A metodologia foi desenvolvida utilizando o *software* Matlab e o teste foi realizado em um sistema real de 135 barras.

Palavras-chave: Religador. Sistema de distribuição. Algoritmo genético. Otimização.

ABSTRACT

Nakamine, G. S. **Development of a Tool for Recloser Parameterization in Power Distribution Systems**. 2019. 56p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

The continuity indicators defined by regulatory agencies are increasingly challenging. To provide consumer satisfaction and safety, these indicators aim to reduce the duration and frequency of power outages caused by short circuits in the system. Distributors have been investing in new technologies and methodologies to avoid these severe penalties and, in this context, many computational tools can be used to minimize these losses. A widely used equipment for minimizing the impacts of short circuits are the reclosers, since they have automatic reclosing capability avoiding the fuse blowing in many cases. However, the correct operation of the recloser depends on a considerable number of adjustments. In this context, this course conclusion paper proposes the development of a tool for the definition of recloser settings installed in the distribution system. The tool developed for reclosers parameterization in power distribution systems is based in genetic algorithm which coordination and selectivity times between the protection equipment and the area isolated by each one of them when a system fault occurs are observed. The final result defines the best recloser adjustable parameter setting to minimize the actuation times of the distribution system equipment ensuring coordination and selectivity with as many devices as possible. The methodology was developed using Matlab software and the test was performed on a real 135-bar system.

Keywords: Recloser. Distribution systems. Genetic algorithm. Optimization.

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais recursos para o desenvolvimento econômico de um país, proporcionando satisfação, bem-estar e segurança para sociedade, é a energia elétrica. Essa é a razão da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) definir limites cada vez mais desafiadores para os índices de continuidade de fornecimento de energia elétrica em especial, os índices DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora e FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, conforme definido no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Para adequarem-se aos valores limites dos novos índices estabelecidos pela ANEEL, eliminando a possibilidade de penalizações e perda das suas concessões, as distribuidoras estão continuamente em busca de melhoria de seus índices de continuidade, seja por meio do aperfeiçoamento das práticas e processos ou do desenvolvimento e adoção de novas tecnologias.

Estima-se que cerca de 80% do tempo de interrupção total do sistema de energia está associado às falhas ocorridas nos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) primário (TENG; LIU, 2003). Tais falhas podem ser classificadas como temporárias ou permanentes e podem ser ocasionadas por diversos motivos como, erros de planejamento, funcionamento indevido de equipamentos, causas naturais e falhas humanas. As faltas temporárias são aquelas em que um equipamento de proteção atua fazendo com que o suprimento de eletricidade seja interrompido por um curto período de tempo e o sistema funcione normalmente depois de religado. Por outro lado, as faltas permanentes são aquelas que necessitam de intervenção humana para corrigir o problema antes do sistema ser religado.

Visando minimizar o impacto das falhas citadas algumas ações de planejamento e equipamentos podem instalados/executados na rede. Dentre os equipamentos de proteção que podem ser instalados na rede, destaca-se o religador. Este é um equipamento muito versátil, que além de operar em situações de faltas permanentes, também pode evitar que o sistema ou parte dele seja desligado devido à uma falta temporária, reduzindo os valores dos índices de continuidade DEC e FEC. Devido a essa versatilidade o religador foi o escolhido como o objeto de estudo desse projeto.

Por todos esses aspectos, uma das iniciativas para atender os índices de continuidade cada vez mais desafiadores dos órgãos reguladores, visando o menor orçamento possível, é encontrar os locais mais apropriados para instalar os equipamentos de proteção no sistema de distribuição. Esse trabalho pode ser realizado por meio de metaheurísticas utilizando técnicas de programação matemática que possibilita definir a quantidade e a posição ótima de maneira precisa proporcionando um resultado satisfatório.

É possível encontrar na literatura alguns trabalhos onde são apresentados alguns modelos e técnicas para a alocação de dispositivos de proteção em redes de distribuição (SILVA; PEREIRA; MANTOVANI, 2004; PREGELJ; BEGOVIC; ROHATGI, 2006; WANG, L.; SINGH, C. R, 2008; HAJIVAND, M. et al., 2014; HASHEMI, S. M. et al., 2016; GUARDA, F. G. K. et al., 2017; KONDO, 2015; IZADI, M. et al., 2019; CONCEIÇÃO, 2018), entretanto além do desafio de encontrar o melhor local para a instalação destes equipamentos, estes devem operar de forma coordenada e seletiva para que o sistema se beneficie ao máximo devido à instalação destes equipamentos. Sendo assim, neste trabalho de conclusão de curso é proposta uma ferramenta para a parametrização de religadores de maneira que os equipamentos instalados nos SDEEs operem de maneira coordenada e seletiva com os demais dispositivos de proteção instalados no sistema.

1.1 Revisão Bibliográfica

Nessa seção serão citados algumas pesquisas já realizadas que serviram como base para realização desse trabalho de conclusão de curso sobre o tema: religadores de tensão.

A literatura especializada desse tema evidencia que já foram aplicados diversos tipos de algoritmos de otimização para a minimização dos custos de instalação de equipamentos de proteção e adequação dos índices de confiabilidade do sistema para atender as exigências dos órgãos reguladores e garantir a satisfação do consumidor. Além disso, observa-se que as prioridades de cada pesquisa são diferentes. Os indicadores de continuidade de energia elétrica que se deseja melhorar, o tamanho da rede de distribuição e os tipos de equipamentos de proteção a serem instalados e a coordenação entre esses dispositivos são algumas das diferenças encontradas.

Apesar da literatura especializada apresentar muitos trabalhos sobre o tema estudado, ainda existem possibilidades não exploradas que serão apresentadas nesse trabalho.

A alocação otimizada de religadores e geradores distribuídos foi realizada por (WANG, L.; SINGH, C. R, 2008) utilizando a técnica de otimização da colônia de formigas. No método proposto foi estudado a otimização na alocação dos religadores considerando os geradores distribuídos fixos e a otimização na alocação dos geradores distribuídos considerando os religadores fixos utilizando o mesmo algoritmo. A função objetivo é minimizar os indicadores de confiabilidade SAIDI e SAIFI e em nenhum momento é citado sobre a coordenação dos dispositivos. Além disso, o número e as possíveis posições dos religadores (ou geradores distribuídos) são as restrições do problema. Para testar a solução final foram utilizados dois sistemas teste, um de 69 e outro de 394 barras.

Em (HAJIVAND, M. et al., 2014) é realizada a alocação otimizada de religadores utilizando um algoritmo evolucionário diferencial binário. A função objetivo visa melhorar os parâmetros SAIDI, MAIFI, SAIFI e CENS. O teste é realizado no sistema IEEE 37 barras

e o sistema possui apenas religadores. Além disso, não é citado em nenhum momento a coordenação entre os religadores. São realizadas três simulações considerando a alocação de um, dois e três religadores na rede de distribuição e, por fim, a solução final é comparada ao resultado de um algoritmo de otimização por enxame de partículas.

Foi proposta uma metodologia de otimização da coordenação entre religador e fusível em (NOJAVAN, M. et al., 2014). O objetivo é minimizar o tempo de operação do fusível e ao mesmo tempo maximizar a utilização de geração distribuída no sistema. Para atingir o resultado esperado, foi desenvolvido um algoritmo de competição imperialista que calcula os melhores parâmetros para os fusíveis que possibilite a coordenação com os religadores que são configurados com o menor *time-dial* possível para a característica 51.

No estudo de (HASHEMI, S. M. et al., 2016) foi desenvolvido um algoritmo genético com o objetivo de determinar o número e a alocação otimizada de fusíveis, seccionadores e religadores em um sistema de distribuição. A instalação desses dispositivos reduzem a duração das faltas e melhoram os indicadores de qualidade, porém o elevado custo desses equipamentos promovem a necessidade de encontrar o melhor custo-benefício. Dessa forma a função objetivo desse problema é encontrar a melhor relação entre o custo desses equipamentos e o retorno de investimento que eles trazem reduzindo os custos de energia não suprida. Os índices analisados nesse trabalho são: MAIFI, SAIFI, SAIDI e ENS. É importante destacar que no algoritmo genético cada posição do cromossomo pode assumir um valor inteiro no intervalo de zero a três que corresponde aos equipamentos: chave, fusível e religador, respectivamente. Já o zero significa que não existe nenhum equipamento naquela posição. Além disso, o método não considera a coordenação entre os equipamentos de proteção. Por fim, o algoritmo é testado em um sistema de 15 barras.

Em (YOUSAFA, M.; MAHMOOD, T., 2017) uma estratégia de reabilitação da coordenação entre religadores e fusíveis é desenvolvida após ser instalado no sistema a geração distribuída. O algoritmo proposto verifica se a presença da geração distribuída afeta a coordenação entre os dispositivos e caso ela aconteça as características instantânea e a com atraso são modificadas ao multiplicar por um fator que considera as correntes que passam pelo religador e pelo fusível. O método considera também a modificação do tamanho do fusível. O sistema em estudo é composto por 168 barras, porém é utilizado apenas parte dele que contém 38 barras.

Um método híbrido foi desenvolvido para fazer a alocação, dimensionamento e coordenação de sistemas elétricos de distribuição por (GUARDA, F. G. K. et al., 2017). Primeiramente é utilizado um algoritmo genético para fazer a alocação de religadores buscando diminuir os indicadores DEC e FEC. Depois, a localização dos fusíveis é determinada utilizando técnicas heurísticas desenvolvidas pelas companhias elétricas de distribuição. Os dispositivos que podem ser encontrados no sistema são: religador, fusível ou seccionador. Além disso, a rede teste utilizada contém dez seções.

Em (KONDO, 2015) é proposta a alocação otimizada de religadores normalmente fechados e normalmente abertos com o objetivo de obter o melhor custo-benefício, visando reduzir os indicadores DEC, FEC e Energia Não Distribuída (END). A metodologia proposta se diferencia das demais, pois ela pode ser aplicada a grandes sistemas de distribuição e faz a alocação de religadores normalmente abertos no sistema, dois pontos que não são comuns em muitas publicações especializadas. O processo de otimização é dividido em três passos. Primeiramente os indicadores de continuidade são equacionados e, para cada alimentador do sistema, são definidas alternativas de posição dos religadores normalmente fechados cuja quantidade é limitada. Na segunda parte é realizado um processo de otimização utilizando algoritmo genético onde as propostas de solução são avaliadas com objetivo de maximizar o custo-benefício do problema. Por fim, na terceira parte, utilizando a mesma metodologia da parte dois, as melhores posições dos religadores normalmente abertos são definidas visando a transferência de grupos consumidores para outros alimentadores em caso de contingência. A coordenação é garantida por meio das distâncias entre os dispositivos.

No trabalho de (IZADI, M. et al., 2019) foi proposto um modelo matemático com o objetivo de minimizar não só os custos com equipamentos, como também os gastos com as interrupções decorrentes de faltas permanentes e temporárias aumentando a confiabilidade do sistema. Foram estudados, em especial, os indicadores SAIDI e MAIFI e o trabalho considera a coordenação dos religadores e fusíveis seguindo as teorias de *fuse blowing* e *fuse saving*. Foram feitos os testes em um sistema de distribuição real e na barra 4 do sistema teste Roy Billinton utilizando quatro tipos de equipamentos, fusível, religador, chaves controladas remotamente e chaves manuais. A solução proposta utiliza programação inteira mista que, diferentemente de outros trabalhos, garante encontrar a solução ótima global.

Em um estudo (PREGELJ; BEGOVIC; ROHATGI, 2006) foi desenvolvida a alocação otimizada de religadores em um sistema com geração distribuída visando o aumento da confiabilidade do sistema. A geração distribuída em conjunto com os dispositivos de proteção alocados de maneira otimizada podem reduzir os impactos das faltas, pois tornam possível a formação de ilhas, aumentando assim, a confiabilidade do sistema. O fluxo de potência bidirecional, a dependência das condições climáticas e a quantidade limitada de potência são os grandes desafios para esse tipo de sistema elétrico. Para contornar todos esse problemas é proposto um método baseado em algoritmos genéticos que tem como objetivo minimizar os indicadores SAIDI, SAIFI e MAIFI, estes definidos pela IEEE Standard 1366. Nesse método, além da posição otimizada dos religadores, são encontradas as melhores posições para os geradores distribuídos, com o objetivo de criar geração ilhada intencionalmente. A coordenação entre os dispositivos de proteção não faz parte do escopo desse artigo.

No trabalho de (SILVA; PEREIRA; MANTOVANI, 2004), os autores também propõem uma metodologia de alocação e realocação otimizada de chaves juntamente com dispositivos de proteção. O objetivo é minimizar os custos fixos de alocação e realocação das chaves e dispositivos de proteção, os custos de energia não suprida por conta das faltas e o custo do serviço de restauração, aumentando a confiabilidade do sistema de distribuição. Nesta proposta assume-se que a coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção alocados em série é atingida sob quaisquer circunstâncias. A técnica de solução propõe um algoritmo genético de variáveis reais e binárias.

No trabalho de (CONCEIÇÃO, 2018) é proposto um modelo de alocação otimizada, coordenada e seletiva de três dispositivos concomitantemente, chaves de manobras, fusíveis e religadores. Além disso, o objeto de estudo é um sistema que possui geração distribuída em que é possível fazer a transferência de carga entre alimentadores vizinhos e gerar operações ilhadas, assim o número de usuários atingidos pelas faltas diminui gerando um aumento nos índices de confiabilidade da rede. O diferencial dessa pesquisa é realizar o processo de otimização considerando a alocação otimizada juntamente com a coordenação dos dispositivos de proteção. A técnica foi desenvolvida em ambiente C++ baseado em algoritmo genético e são comparados dois tipos de estratégias para mensurar a eficiência do modelo matemático. A primeira é um recurso que faz a alocação e coordenação no mesmo processo e a segunda é um método em que a alocação e a coordenação são realizados em processos separados.

Apesar de existirem muitos trabalhos apresentados na literatura sobre a alocação de religadores e dispositivos de proteção, alguns deles não consideram a coordenação e seletividade durante o processo de otimização, ou quando considerado não se preocupam em encontrar o melhor ajuste possível. Desta maneira este trabalho tenta preencher esta lacuna, apresentando uma metodologia para o ajuste/parametrização ótima de religadores em sistemas SDEEs.

1.2 Objetivo e motivação

O problema de religadores em sistemas de distribuição de energia elétrica tem por objetivo determinar onde, quando e que tipos de componentes devem ser instalados ao longo do horizonte de planejamento de modo a satisfazer as especificações técnicas e operacionais referentes à continuidade do serviço de fornecimento de energia. A tarefa é bastante desafiadora para as concessionárias de distribuição, uma vez que elas devem buscar a melhor relação custo/benefício entre os investimentos de capital no projeto e os índices de confiabilidade resultantes do investimento. Analisando principalmente os trabalhos de (CONCEIÇÃO, 2018; SILVA; PEREIRA; MANTOVANI, 2004; GUARDA, F. G. K. et al., 2017) observou-se a importância de realizar a coordenação e seletividade entre os dispositivos de proteção do sistema, principalmente quando considera-se os religadores.

Assim, surgiu a motivação para este trabalho de conclusão de curso, cujo resultado final será desenvolver uma ferramenta, à partir de metaheurísticas, que defina a melhor configuração dos parâmetros ajustáveis dos reléadores com o objetivo de minimizar o tempo de atuação dos dispositivos presentes SDEEs e garantir a coordenação e seletividade com o maior número de dispositivos.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão apresentados alguns fundamentos básicos para o entendimento da metodologia proposta neste trabalho.

2.1 Religadores

Os religadores (figura 1) são dispositivos automáticos de interrupção de circuitos de média tensão responsáveis por isolar parte do sistema quando um problema, como um curto-circuito, ocorre. O religador funciona da seguinte maneira: quando o curto-circuito acontece, o religador identifica o surto e automaticamente desliga o sistema de energia. Após alguns instantes, que depende de suas características e configurações, o dispositivo religa o sistema, porém se o problema ainda persistir, ele desliga novamente. Nas configurações mais recorrentes o religador é programado para que, após três tentativas, o dispositivo considere a falta como permanente e, dessa forma, ele permaneça aberto (desligado) até que a equipe de manutenção da companhia de energia verifique o motivo do curto-circuito e assim religue o equipamento restaurando o fornecimento de energia.

Figura 1: Religador e seu sistema de controle



Fonte: (SIEMENS, 2018)

A flexibilidade é outra característica importante para se ressaltar nesse tipo de equipamento. Os religadores possuem característica corrente-tempo que os tornam fáceis

de serem coordenados com outros religadores, ao menos os de mesmo fabricante, e com outros equipamentos como relés e fusíveis (ANDERSON, 1998).

Esse tipo de dispositivo pode economizar muito tempo e dinheiro para a companhia de distribuição de energia, uma vez que ele é capaz de restaurar o sistema automaticamente, sem que seja necessário intervenção humana. Além disso, para os casos de faltas permanentes, ele minimiza a área de falta de energia isolando o problema de forma eficiente e facilita as equipes de reparo encontrar a localização do problema. Assim, a energia elétrica é restaurada mais rapidamente garantindo a satisfação dos consumidores ao mesmo tempo que melhora os indicadores de confiabilidade monitorados pelas agências regulamentadoras.

2.1.1 Características

Os religadores que servirão como base desse trabalho são os do tipo microprocessados com a capacidade de detectar sobrecorrentes de fase-fase e fase-terra. Estes dispositivos podem operar em uma faixa característica de tempo-corrente considerável, facilitando assim, a coordenação com outros dispositivos de proteção.

É importante mencionar também as funções de proteção dos religadores considerados nesse trabalho (IEEE, 1996):

- 50 - Sobrecorrente instantânea: Dispositivo opera sem atraso de tempo quando a corrente excede um valor predefinido;
- 50TD - Sobrecorrente de tempo definido: Dispositivo opera com atraso de tempo quando a corrente excede um valor predefinido.
- 51 - Sobrecorrente de tempo ac: Dispositivo que funciona quando uma corrente AC de entrada excede um valor predeterminado, sendo que a corrente de entrada e o tempo operacional são inversamente relacionados por meio de uma parte substancial de desempenho;
- 79: Dispositivo que controla automaticamente o fechamento e travamento de um disjuntor do circuito ac.

As características 50TD e 50 são modeladas da seguinte maneira:

$$t^{50}(I) = 0,05 \cdot td^{50} \quad (2.1)$$

Onde:

- $t^{50}(I)$: Tempo de operação da característica 50 e 50TD, em segundos.

- td^{50} : Ajuste do tempo de operação, em segundos.

Por outro lado, o tempo de operação da característica 51 pode ser modelada matematicamente da seguinte forma (IEEE, 2018):

$$t^{51}(I) = \left(\frac{A}{M^p - 1} + B \right) \cdot td^{51} \quad (2.2)$$

Onde:

- $t^{51}(I)$: Tempo de operação da característica 51, em segundos.
- M: Corrente expressa como múltiplo da corrente de *pick-up*. ($I_{\text{input}}/I_{\text{pick-up}}$, onde $I_{\text{pick-up}}$ é a corrente mínima de operação.)
- td^{51} : Time dial é um controle que permite ajustar as características de um religador para que ele funcione em um tempo de operação predeterminado com uma corrente específica.
- A, B e p: Constantes (Tabela 1)

Tabela 1: Constantes para características tempo-corrente padrão.

Característica	A	B	p
Moderadamente inversa	0,0515	0,114	0,02
Muito inversa	19,61	0,491	2,0
Extremamente inversa	28,2	0,1217	2,0

Fonte: (IEEE, 2018)

As características muito inversa e extremamente inversa são as mais utilizadas na proteção de SDEE, tendo em vista sua adequação em termos de coordenação com fusíveis e religadores (CONCEIÇÃO, 2018). Por fim, a característica 79 é muito utilizada em dispositivos de proteção que têm como foco isolar o sistema de faltas temporárias. Usualmente o religador efetua três tentativas de religamento automático, como já foi dito anteriormente.

2.2 Fusíveis

Os fusíveis são dispositivos de proteção que atuam quando ocorre uma elevação anormal da corrente no sistema elétrico. Os elos dos fusíveis possuem uma espessura pré-determinada e são feitos com um material específico, geralmente zinco, cobre, prata, alumínio ou uma liga metálica. Dessa forma, ele mantém o funcionamento normal do

círcuito, trabalhando como um fio condutor, até uma corrente superior à sua capacidade de condução percorrer o filamento do dispositivo. O filamento é rompido em decorrência do calor causado pela corrente provocando a interrupção da circulação de corrente pelo sistema. Por isso, esses dispositivos de proteção são instalados em série e precisam ser trocados manualmente.

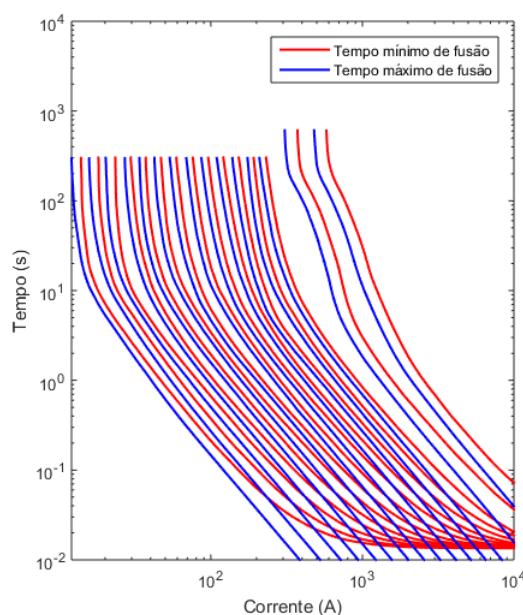
Figura 2: Fusível



Fonte: (S&C FUSES)

Os fusíveis que serão utilizados nesse trabalho serão os de tipo T (6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 65, 80, 100, 140 e 200 Amperes), de ação lenta. A figura 3 representa o gráfico que mostra as curvas de tempo-corrente desse tipo de fusível.

Figura 3: Curvas dos Fusíveis Tipo T



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se pela figura 3 que quanto maior a corrente de curto-circuito menor é o tempo de fusão. Além disso, não existe a possibilidade de estabelecer um tempo de atuação exato para o fusível, pois características como temperatura ambiente e corrente de carga podem influenciar na temperatura de fusão do dispositivo. Devido a este fato, os fabricantes determinam uma faixa aceitável de operação entre duas curvas que representam o tempo mínimo de fusão e o tempo máximo.

2.3 Coordenação e Seletividade

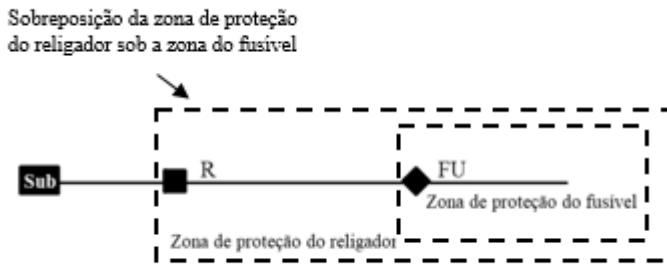
Um sistema de proteção bem projetado deve atender as seguintes funcionalidades:

- Rapidez - deve atuar no menor tempo possível de modo a garantir a continuidade do suprimento e a operação em condições normais das partes “saudáveis” do SDEE;
- Confiabilidade - deve atuar corretamente no momento requerido e não operar de maneira indesejada;
- Sensível - deve ser capaz de identificar operações anormais que excedam o valor limite (*pick-up*), respondendo à sobrecargas e a curto-circuitos;
- Seletividade - deve ser capaz de retirar de operação apenas a parte defeituosa do circuito sem alterar as condições dos circuitos “saudáveis”;
- Coordenado - na presença de dois ou mais dispositivos em série, operar em uma sequência preestabelecida, garantindo a seletividade.

Todas estas funcionalidades estão relacionadas com os ajustes de cada um dos dispositivos instalados na rede. No caso dos religadores os ajustes podem ser parametrizados enquanto nos fusíveis os tempos de atuação dependem de sua fabricação. Para exemplificar, apresenta-se a filosofia de coordenação e seletividade entre um religador e um fusível em relação às características 50 e 51 do religador já mencionadas na seção 2.1.1.

Na coordenação, a meta é fazer com que a característica 50 do religador(R) sobreponha a zona de proteção do fusível(FU), como ilustrado na Figura 4. Dessa forma, caso ocorra uma falta na zona de proteção do fusível, o religador irá entrar em ação primeiro, antes do fusível provocar o desligamento permanente dos ramais a jusante. O objetivo do esquema coordenado é eliminar as faltas temporárias sem que haja o desligamento definitivo dos ramais protegidos pelos fusíveis (CONCEIÇÃO, 2018).

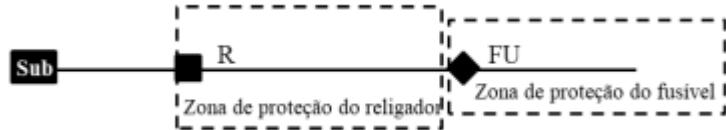
Figura 4: Coordenação entre fusível e religador



Fonte: Adaptado de (CONCEIÇÃO, 2018)

Por outro lado, quando é utilizada a técnica da seletividade, o fusível irá atuar em todas as faltas que ocorrerem dentro da sua zona de proteção sem causar qualquer operação no religador. Esse esquema está ilustrado na Figura 5 e está relacionado com a particularidade de operação com atraso intencional do religador, característica 51.

Figura 5: Seletividade entre fusível e religador



Fonte: (CONCEIÇÃO, 2018)

2.3.1 Coordenação fusível-religador

Em relação à característica 50 do religador, este deve atuar antes que ocorra a fusão do elo do fusível para qualquer corrente de curto-círcuito (figura 4). Dessa forma, pode-se modelar matematicamente essa operação conforme a Equação 2.3.

$$t_{Fu}(I_{Fu}^{CC}) \geq k \cdot td_{Re}^{50}(I_{Re}^{CC}) \quad (2.3)$$

Onde:

- t_{Fu} : Tempo mínimo de atuação do fusível.
- I_{Fu}^{CC} : Corrente de curto-círcuito que passa pelo fusível.
- td_{Re}^{50} : Tempo de operação do religador.
- I_{Re}^{CC} : Corrente de curto-círcuito que passa pelo religador.

- k: Fator de segurança.

O fator k é um fator de segurança que representa a fadiga do elo do fusível na sequência de religamentos que o religador faz após identificar um pico de corrente. Ele é imprescindível na análise que deve ser feita onde o tempo mínimo de fusão do elo do fusível não seja menor que o tempo de operação do religador.

Já em relação à característica 51, independentemente da corrente que passa pelo fusível, este deve atuar garantindo a seletividade da zona de proteção (Figura 5). Nessa condição, o elo do fusível funde antes que a característica 51 do religador entre em operação. Assim, pode-se modelar essa prática conforme a Equação 2.4.

$$t_{Fu}(I_{Fu}^{CC}) \leq t_{dRe}^{51}(I_{Re}^{CC}) + t_{Re-Fu}^{coord} \quad (2.4)$$

Onde:

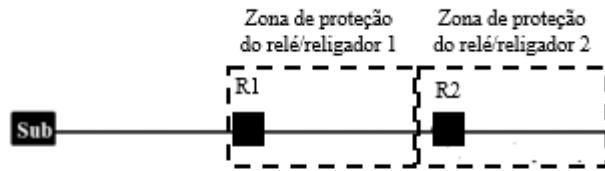
- t_{Fu} : Tempo mínimo de atuação do fusível.
- I_{Fu}^{CC} : Corrente de curto-circuito que passa pelo fusível.
- t_{dRe}^{51} : Tempo de operação do religador.
- I_{Re}^{CC} : Corrente de curto-circuito que passa pelo religador.
- t_{Re-Fu}^{coord} : Fator de segurança.

O tempo (t_{Re-Fu}^{coord}) que é somado ao tempo de atuação do religador é a margem de segurança que leva em consideração o tempo de abertura do circuito realizada pelo religador e garante que este não opere antes do fusível em casos extremos.

2.3.2 Coordenação relé-religador

Na coordenação entre relés e religadores, tanto na característica 50 quanto na 51, deve garantir a seletividade do equipamento que estiver à jusante. No exemplo da Figura 6, por exemplo, o tempo de atuação do religador/relé deve ser menor que o dispositivo que funciona como retaguarda fazendo com que o R2 atue em uma falta que ocorra à jusante dentro de sua zona de proteção.

Figura 6: Coordenação relé-religador



Fonte: (CONCEIÇÃO, 2018)

A equação que descreve esse funcionamento pode ser expressa como 2.5:

$$td_{R1}^{50/51}(I_{R1}^{CC}) \geq td_{R2}^{50/51}(I_{R2}^{CC}) + t_{Re-Re}^{coord} \quad (2.5)$$

Onde:

- $td_{R1}^{50/51}$: Tempo mínimo de atuação do relé/religador 1.
- I_{R1}^{CC} : Corrente de curto-circuito que passa pelo relé/religador 1.
- $td_{R2}^{50/51}$: Tempo de operação do relé/religador 2.
- I_{R2}^{CC} : Corrente de curto-circuito que passa pelo relé/religador 2.
- t_{Re-Re}^{coord} : Fator de segurança do tempo de coordenação entre R1 e R2.

É extremamente importante ressaltar que serão utilizadas as correntes de curto-circuito máximas e mínimas já calculadas para todos os ramos do sistema. Quando os religadores estão atuando na característica 51 são utilizadas as correntes máximas, ao passo que na característica 50 utiliza-se as correntes mínimas.

As equações apresentadas nesta seção para assegurar a coordenação e seletividade entre os dispositivos instalados na rede, serão utilizadas na ferramenta desenvolvida para a parametrização ótima dos religadores.

2.4 Indicadores DEC e FEC

A correta parametrização dos religadores influencia diretamente nos indicadores de continuidade e confiabilidade do SDEE. Sendo assim, nesta seção serão explicadas as definições de alguns indicadores de continuidade muito importantes para as empresas de distribuição, Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). As informações

foram retiradas da última revisão (10) do Módulo 8 que se refere à qualidade da energia elétrica dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

Segundo o PRODIST (ANEEL, 2016), os indicadores DEC e FEC podem ser calculados como 2.6 e 2.7 respectivamente.

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC(i)}{Cc} \quad (2.6)$$

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC(i)}{Cc} \quad (2.7)$$

Onde:

- DEC: duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora;
- FEC: frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções;
- i: índice de unidades consumidoras atendidas em baixa tensão ou média tensão faturadas do conjunto;
- Cc: número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em baixa tensão ou média tensão;
- DIC(i): Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, excluindo-se as centrais geradoras, expressa em horas e centésimos de hora (equação 2.8);
- FIC(i): Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, excluindo-se as centrais geradoras, expressa em horas e centésimos de hora (equação 2.9);

Em que precisamos citar também os indicadores de continuidade individuais:

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (2.8)$$

$$FIC = n \quad (2.9)$$

Onde:

- DIC: duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;
- FIC: frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em número de interrupções;
- i: índice de interrupções da unidade consumidora ou por ponto de conexão no período de apuração, variando de 1 a n;
- n: número de interrupções da unidade consumidora ou por ponto de conexão considerado, no período de apuração;
- $t(i)$: tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada ou do ponto de conexão, no período de apuração;

A correta operação dos religadores em conjunto com os demais dispositivos de proteção instalados no SDEE minimizam o impacto das faltas, reduzindo o número de consumidores afetados e também o tempo de interrupção dos consumidores.

2.5 Algoritmo Genético

O algoritmo genético (AG) é um método meta-heurístico inspirado em características observadas na natureza, como a seleção natural e a genética, utilizado para encontrar o melhor resultado de um problema de otimização. A estrutura do método de otimização desenvolvido por John Henry Holland em 1975 (HOLLAND, J. H. et al., 1992) segue basicamente a teoria evolutiva proposta por Charles Darwin, onde os indivíduos mais adaptados ao ambiente possuem mais chances de sobreviver e deixar herdeiros. A consequência disso é a população, ao longo das gerações, evoluir para se adaptar melhor ao ambiente em que vivem.

A utilização de AG para resolver problemas de otimização está condicionado à correta representação do problema através da codificação. Uma má codificação pode levar à resultados equivocados, inviabilização da aplicação dos operadores genéticos entre outros problemas (JÚNIOR, P.; RODRIGUES, B., 2009). Uma vez definida a codificação adequada para o problema que se deseja resolver o funcionamento do algoritmo se baseia nos seguintes conceitos: população, cromossomo, aptidão, seleção, recombinação, mutação e elitismo (HOLLAND, J. H. et al., 1992).

Após ter bem definido o problema de minimização/maximização e as suas respectivas restrições, o ponto de partida é a definição do tamanho da população e das taxas de recombinação, mutação e elitismo. Esses parâmetros devem ser bem definidos, uma vez que influenciam diretamente a eficiência do AG.

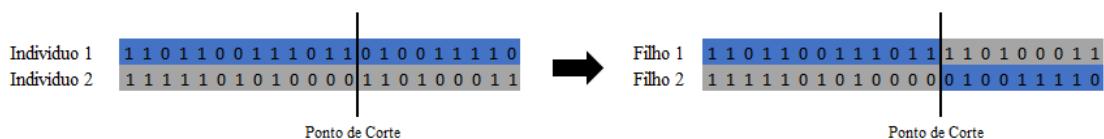
A população é o conjunto de indivíduos que usualmente são representados por vetores que podem ser binários, inteiros ou reais onde cada posição do vetor indica a presença de uma determinada característica. Assim, depois de definir o seu tamanho, é gerada uma população formada por indivíduos aleatórios.

Após a formação da população inicial, o próximo passo é calcular a aptidão de cada indivíduo, ou seja, medir o quanto adaptado cada indivíduo está em relação ao problema proposto. Dessa forma, é possível iniciar o processo de seleção. Nessa parte são escolhidos os indivíduos da população corrente que vão fazer parte da próxima geração de indivíduos. A técnica de seleção mais utilizada é a seleção proporcional que utiliza a técnica da roleta em que aleatoriamente são escolhidos os membros que serão parte da geração futura. No esquema da roleta, primeiro divide-se um círculo com n posições espaçadas igualmente, onde n é o tamanho da população. Após esse passo, a roleta é girada n vezes e a posição escolhida em cada giro indica o indivíduo selecionado. Existem outros tipos de variações da seleção proporcional que modifica ou elimina algumas partes dessa metodologia. A seleção estocástica do resíduo, seleção determinística e seleção com limitante superior do número máximo de descendentes são exemplos de formas derivadas da seleção proporcional. (RAIMANN, E. et al., 2007)

Assim como ocorre na natureza, nesse ponto entra em ação os operadores genéticos recombinação e mutação. Eles são responsáveis por proporcionar variedade à população o que resulta em novos indivíduos com características que possam se adaptar melhor ao ambiente em que vivem. Não são todos os cromossomos da geração futura que são afetados, por isso inicialmente foi definida uma taxa de recombinação e outra de mutação para estabelecer a chance de um indivíduo sofrer a ação de cada operador genético.

Na recombinação são escolhidos aleatoriamente dois cromossomos da população corrente e depois são selecionados pontos em que será executado o operador genético também de forma aleatória. Existem vários tipos de recombinação e a diferença entre elas está justamente no número de pontos em que ela pode ocorrer. Apesar de existirem diversos tipos, eles funcionam da mesma maneira, a partir dos pontos selecionados as informações dos indivíduos são trocadas. A figura 7 ilustra a aplicação de uma recombinação de um ponto em um cromossomo com representação binária.

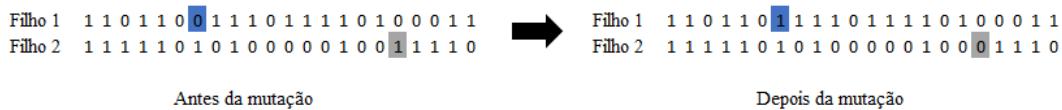
Figura 7: Exemplo de crossover



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a recombinação ocorre o processo de mutação. Dada a taxa de mutação, caso o indivíduo seja selecionado para sofrer a ação desse operador, é escolhido aleatoriamente a posição do cromossomo em que a informação será trocada. Caso a representação do cromossomo seja binária, o operador mutação inverte os valores de um dado bit de 0 para 1 ou vice-versa. A figura 8 ilustra um exemplo da mutação nos mesmos cromossomos filhos da figura 7.

Figura 8: Exemplo de mutação



Fonte: Elaborado pelo autor

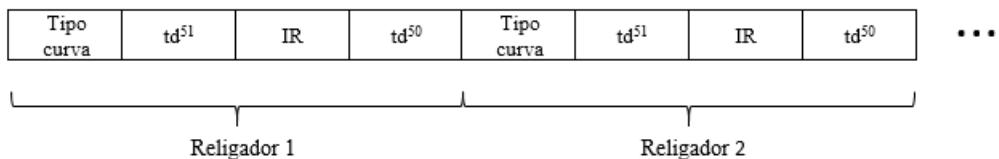
Observa-se que durante o processo de seleção o melhor cromossomo pode ser perdido de uma geração para outra não só devido à aleatoriedade do processo de seleção, como também por conta do cruzamento e da mutação. Para contornar esse problema é utilizada a técnica do elitismo que foi proposto por DeJong em 1975 (JONG, K. A. D., 1975). Dada a taxa de elitismo definida no início do algoritmo genético, os melhores indivíduos são selecionados sem alterações para fazer parte da próxima geração. Na maior parte dos problemas, aqueles que utilizam essa técnica observa-se que o problema converge mais rapidamente e, por isso, ela é muito utilizada em AG tradicionais.

Após todo esse processo é gerada uma nova população e esse processo se repete até que o critério de parada seja atendido. Alguns critérios de parada são: número de iterações, resultado da aptidão, desvio padrão ou pela obtenção de uma solução satisfatória.

3 METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

Com o objetivo de atender ao que foi proposto, uma metodologia para parametrização de religadores em sistemas de distribuição foi desenvolvida. Foi proposto um AG que encontrasse as variáveis A , B , p , td^{51} , a corrente de *pick-up* da equação 2.2 e a variável td^{50} da equação 2.1. Dessa forma, a codificação do indivíduo da população de um sistema que possui n religadores, pode ser definido da seguinte maneira:

Figura 9: Indivíduo do Algoritmo Genético



Fonte: Elaborado pelo autor

As posições do vetor que representa o indivíduo podem assumir valores reais. Além disso, foi definida como característica adicional do indivíduo IR, a porcentagem da corrente nominal que passa pelo religador, que será considerada como a corrente de *pick-up* da equação 2.2.

A curva do religador na característica 51 (Tipo curva) e a corrente de *pick-up* (IR) podem assumir valores inteiros dentro do intervalo [1, 3]. As tabelas 2 e 3 indicam as possibilidades do indivíduo para essas duas características com os respectivos valores que as variáveis do tempo inverso do religador, equação 2.2, podem assumir.

Tabela 2: Valores possíveis para característica Tipo curva.

Tipo curva	A	B	p
1	0,0515	0,114	0,02
2	19,61	0,491	2
3	28,2	0,1217	2

Fonte: (IEEE, 2018)

Tabela 3: Valores possíveis para característica IR.

IR	$I_{pick-up}$
1	115%
2	120%
3	125%

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores de *time-dial* dependem do tipo de religador que é utilizado e representam os próprios valores que são utilizados nas equações 2.1 e 2.2. Nesse trabalho a característica td^{50} pode assumir valores inteiros no intervalo [1, 10] e a característica td^{51} , valores variando de 0,5 em 0,5 no intervalo [0,5, 10].

Já as restrições do problema são dadas pelas equações de coordenação e seletividade entre os dispositivos de proteção, 2.3, 2.4 e 2.5. É importante ressaltar que, para a característica 50, a corrente de *pick-up* foi definida como 90% da corrente mínima de curto-círcuito do ramo.

Por fim, a função objetivo do algoritmo genético é minimizar a soma dos tempos de atuação dos equipamentos presentes no sistema elétrico de potência em estudo, equação 3.1.

$$FO = \min \sum_{i=1}^n t_i^{50} + \sum_{j=1}^m t_j^{50} + \sum_{i=1}^n t_i^{51} + \sum_{j=1}^m t_j^{51} \quad (3.1)$$

Onde,

- FO: Função objetivo.
- n: Número de religadores no sistema.
- m: Número de equipamentos no sistema que fazem parte da mesma seção.
- t^{50} : Tempo de atuação do dispositivo na característica 50.
- t^{51} : Tempo de atuação do dispositivo na característica 51.

Como penalizações para função objetivo, foram definidas a diferença do tempo de não coordenação ou não seletividade com o tempo mínimo para solução ser factível e as potências das barras que serão isoladas de acordo com a configuração do indivíduo após uma falta permanente ou temporária. Essas características garantem que o maior número de dispositivos sejam coordenados e/ou seletivos visando minimizar a quantidade

de consumidores afetados em decorrência de uma falta no sistema. As equações 3.2 e 3.3 mostram como foram definidas as penalizações no algoritmo.

$$P_t = |t_i^{50/51} - t_j^{50/51}| \cdot fp \quad (3.2)$$

Onde:

- P_t : Penalização de tempo.
- $t_i^{50/51}$: Tempo de operação do dispositivo i, em segundos.
- $t_j^{50/51}$: Tempo de operação do dispositivo j, em segundos.
- fp: Fator de penalização.

$$P_{Pot} = \sum_{i=1}^b P_i \quad (3.3)$$

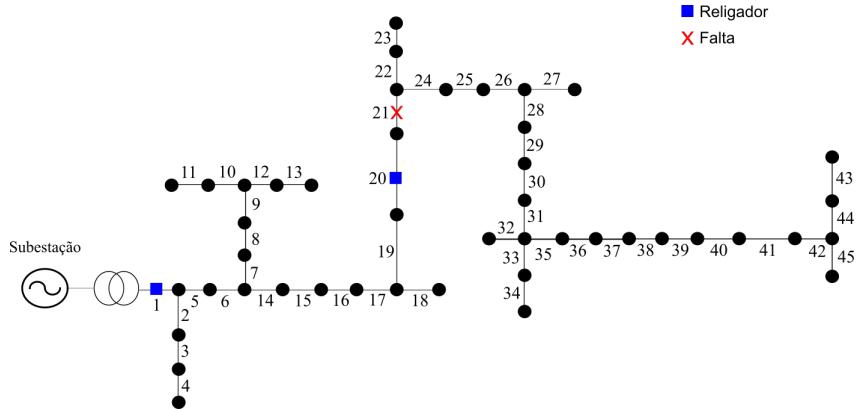
Onde:

- P_{Pot} : Penalização de potência.
- b : Barras à jusante do dispositivo de atuação mais rápida.
- P_i : Potência da barra i à jusante do dispositivo.

Um exemplo da penalização do modelo proposto está indicado na figura 10. Supondo que exista dois religadores em um sistema de 45 barras e ocorra uma falta na seção do religador mais longe da subestação. Para facilitar o entendimento, a partir desse capítulo, em todos os exemplos e simulações, foi atribuído a cada equipamento de proteção o mesmo nome do ramo em que este foi alocado.

Neste caso, o religador do ramo 1 não coordenou com o religador posicionado no ramo 20, ou seja, o tempo de atuação do religador 1 é menor do que o religador 20. Dessa forma, a penalização seria o módulo da diferença de tempo de atuação de cada dispositivo multiplicado por um fator penalizador coerente com o problema. Esta penalização é somada à somatória das potências de todas as barras a jusante do religador 1 que iria atuar isolando toda essa porção no caso de uma falta na seção do religador 35.

Figura 10: Exemplo de penalização



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados de entrada que devem ser fornecidos são:

- Configuração e características do sistema de distribuição:
 - Matriz de ligações nó pai e nó filho (somente para redes radiais);
 - Potência em cada nó da rede de distribuição;
 - Matriz de correntes de curto-circuito;
 - Corrente nominal dos ramos
- Posição dos religadores
- Posição e tipo dos fusíveis utilizados
- Dados das curvas dos fusíveis

A matriz de correntes de curto-circuito indica quais são as correntes que passam em cada ramo do sistema. A figura 11 apresenta um exemplo de como descobrir a corrente que passa pelo ramo 10 em decorrência de uma falta no ramo 15, cujo valor é 1724,85 A. O eixo horizontal representa o ramo em que a falta ocorre, enquanto o eixo vertical indica qual corrente que atravessa o ramo. Ao cruzar as duas informações, é possível encontrar o valor desejado. Para o estudo desse trabalho é necessária a matriz de correntes máximas e mínimas de curto-circuito tanto de fase, quanto a de neutro.

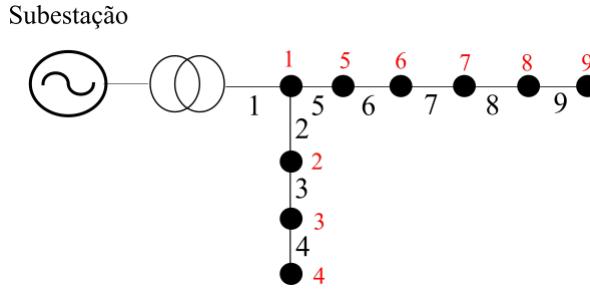
Figura 11: Exemplo matriz de curto-circuito

Ramo do Dispositivo	RAMO EM FALTA																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2244,40	2006,03	1990,14	1969,66	1979,90	1934,74	1890,90	1848,09	1847,15	1834,85	1803,03	1788,21	1781,97	1743,69	1736,37	1786,26	1781,29	1771,14
2	282,38	2006,03	1990,14	1969,66	1979,90	1934,74	1890,90	1848,09	1847,15	1834,85	1803,03	1788,21	1781,97	1743,69	1736,37	1786,26	1781,29	1771,14
3	282,38	279,52	1990,14	1969,66	1979,90	1934,74	1890,90	1848,09	1847,15	1834,85	1803,03	1788,21	1781,97	1743,69	1736,37	1786,26	1781,29	1771,14
4	2,18	2,36	2,18	1804,26	2,28	2,40	2,21	2,43	2,29	2,45	2,37	2,24	2,30	2,27	2,39	2,17	2,16	2,22
5	280,93	277,73	278,45	276,38	1978,58	1933,70	1889,79	1846,99	1845,96	1833,86	1801,66	1787,00	1780,71	1742,52	1734,97	1785,08	1780,08	1769,87
6	280,93	277,73	278,45	276,38	278,23	1933,70	1889,79	1846,99	1845,96	1833,86	1801,66	1787,08	1780,71	1742,52	1734,97	1785,08	1780,08	1769,87
7	277,59	274,63	276,12	274,56	274,72	277,78	1887,86	1845,09	1843,67	1831,68	1799,39	1785,23	1778,43	1740,25	1732,76	1783,08	1778,31	1767,82
8	274,72	272,17	273,17	271,59	272,14	275,08	277,72	1842,91	1841,56	1829,81	1797,31	1783,55	1776,47	1738,02	1730,21	1781,03	1776,12	1765,65
9	270,00	267,39	269,20	267,41	268,07	270,41	272,91	269,00	1838,32	1827,28	1794,34	1780,97	1773,33	1734,67	1726,94	1777,99	1772,58	1762,47
10	266,56	264,66	265,75	264,79	264,93	267,67	269,43	265,36	269,22	2825,05	1792,28	1778,64	1771,37	1732,34	1724,80	1775,73	1770,33	1760,19
11	263,37	261,24	263,05	261,55	261,92	264,54	266,43	261,69	266,32	264,31	1790,19	1776,56	1769,38	1729,82	1723,07	1773,81	1768,12	1758,07
12	31,18	31,75	30,56	30,74	31,54	31,21	31,44	30,64	32,28	31,33	31,58	1625,98	1617,76	1571,36	1562,97	1623,82	1617,82	1605,50
13	7,40	7,40	7,25	7,42	7,68	7,09	7,01	7,44	7,61	7,17	7,12	7,62	1604,30	1557,38	1548,37	7,38	7,38	7,32
14	7,03	7,05	6,91	7,07	7,46	6,78	6,61	7,04	7,35	6,79	6,76	7,30	6,98	1557,16	1548,14	7,11	7,01	6,95
15	3,74	3,56	3,98	3,85	3,93	3,72	3,61	3,82	3,88	3,59	3,88	3,83	3,72	3,79	1546,21	3,93	3,61	3,60
16	25,36	25,56	25,19	24,33	24,75	25,08	25,41	24,18	26,07	25,13	24,69	24,87	24,72	24,52	24,14	1619,92	1614,29	1601,75
17	20,43	20,70	20,52	19,33	19,81	20,52	19,48	19,45	20,05	20,17	21,05	20,20	20,26	20,63	19,85	19,68	1612,12	1599,48
18	18,25	18,92	18,52	17,53	18,02	18,76	17,62	17,93	18,38	18,75	18,92	18,32	18,63	18,73	17,84	17,80	18,16	1598,29
19	13,49	13,59	13,91	13,47	13,25	14,13	12,99	13,30	13,31	13,35	14,10	13,41	13,59	14,30	13,32	13,26	13,42	13,12
20	8,48	8,86	9,13	8,57	8,44	9,46	8,38	8,49	8,59	8,75	8,74	8,63	9,11	8,62	8,83	8,94	8,76	8,68

Fonte: Elaborado pelo autor

O algoritmo só irá funcionar se a configuração das ligações e a matriz de correntes de curto-circuito seguirem um determinado padrão. Os dois dados de entrada devem ser fornecidos de acordo com a seguinte regra: o nome do ramo em que os dispositivos de proteção podem ser alocados deve ser igual ao nó conectado ao final do ramo. Como referência o início do ramo é sempre a barra mais próxima à subestação.

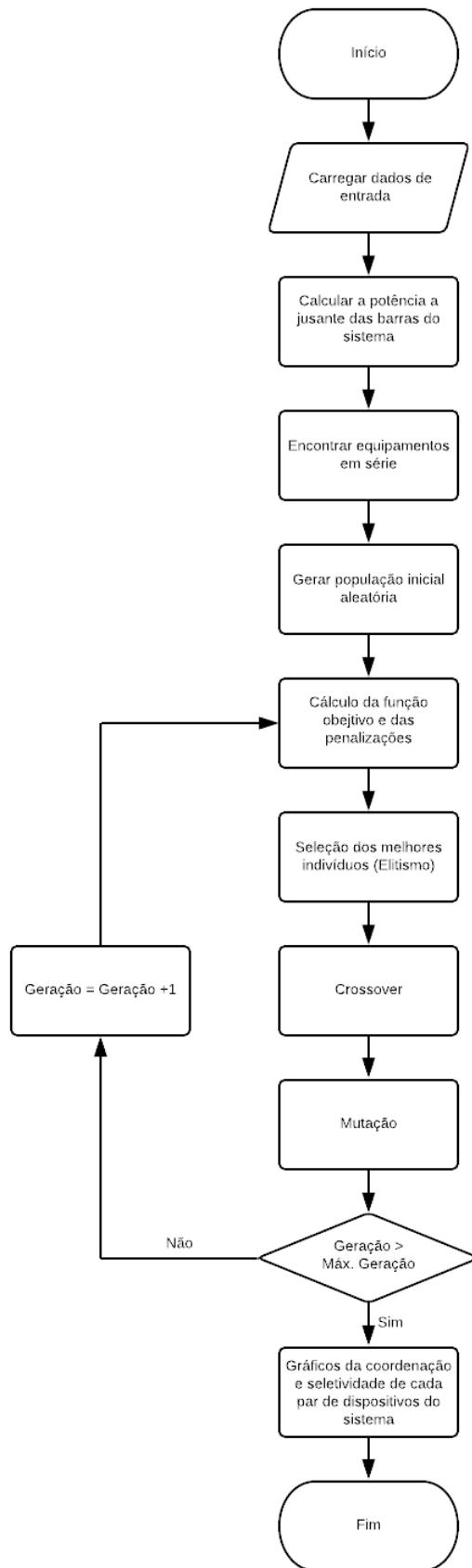
Figura 12: Exemplo configuração nós e ramos de uma região do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor

Após definir todas essas premissas, foi desenvolvida a ferramenta no ambiente *Matlab* utilizando os conceitos do algoritmo genético descrito na seção 2.5. A figura 13 representa o algoritmo desenvolvido nesse trabalho.

Figura 13: Fluxograma do algoritmo desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente todos os dados de entrada são carregados, configuração e características do sistema de distribuição, posição dos religadores, posição e tipo dos fusíveis utilizados e dados das curvas dos fusíveis. A fim de aplicar as penalizações, são calculadas a potência total à jusante de cada barra do sistema. Para fazer esse cálculo é utilizado a matriz contendo a potência em cada nó da rede de distribuição e como referencia para saber quais as barras estão a jusante utiliza-se a matriz de ligações nó pai e nó filho.

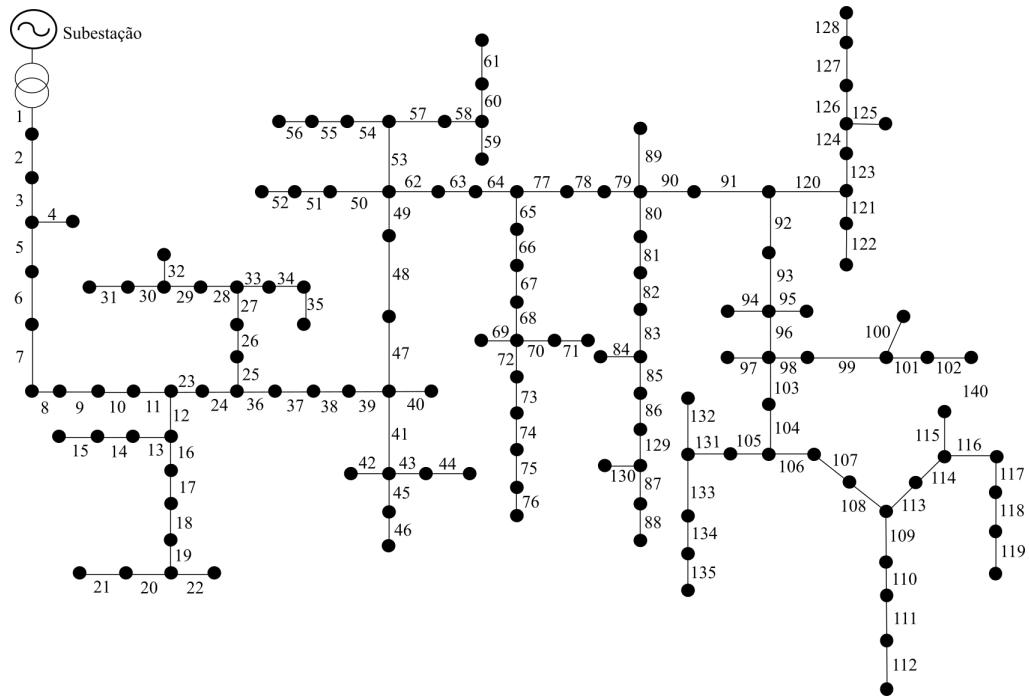
Após preparar as penalizações que poderão ser aplicadas no algoritmo genético, a terceira etapa é encontrar os ramos dos dispositivos que estão em série. Caso o sistema fosse o mesmo representado na figura 10 seria indicado que o equipamento localizado no ramo 1 está em série com o posicionado no ramo 20 e este não possui nenhum outro equipamento de proteção em série com ele. A quarta etapa envolve o algoritmo genético em que são utilizados as informações desse capítulo em conjunto com a teoria desse tipo ferramenta computacional evolutiva que está descrito na seção 2.5.

Por fim, os gráficos da melhor configuração encontrada para os religadores são construídos. A coordenação e seletividade de cada par de equipamento em série apresentados para as características 50 e 51. O título do gráfico indica se houve coordenação e/ou seletividade entre os dois dispositivos em questão.

4 RESULTADOS DO TRABALHO

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos pela ferramenta proposta nos capítulos anteriores. Foram feitas duas simulações para validar o AG utilizando um sistema real de 135 barras adaptado de (CONCEIÇÃO, 2018).

Figura 14: Sistema Real de 135 Barras



Fonte: Adaptado de (CONCEIÇÃO, 2018)

A primeira foi utilizando uma topologia em que não seria possível coordenar todos os dispositivos de proteção. Já a segunda foi realizada modificando os fusíveis críticos, ou seja, aqueles que não possuíam características suficientes para atender a coordenação e seletividade junto aos religadores do sistema.

As taxas do algoritmo genético que foram utilizadas estão descritas na tabela 4, cuja definição foi realizada através da percepção do operador através de vários testes.

Tabela 4: Taxas utilizadas no algoritmo genético.

	Crossover	Mutação	Elitismo
Taxa	90%	20%	20%

Foi definido mil como o número de iterações e o fator de penalização da equação 3.2.

A tabela 5 mostra os intervalos em que o *time-dial* nas características 50 e 51 pode variar que serve tanto para o neutro, quanto para fase e os fatores de segurança adotados para as restrições de coordenação e seletividade.

Tabela 5: Limites do religador e fatores de coordenação e seletividade.

	$td_{Re_{min}}^{50N/F}$	$td_{Re_{max}}^{50N/F}$	$td_{Re_{min}}^{51N/F}$	$td_{Re_{max}}^{51N/F}$	td_{Re-Fu}^{coord}	td_{Re-Re}^{coord}	k
Tempo	1 s	10 s	0,5 s	10 s	0,2 s	0,05 s	1,35

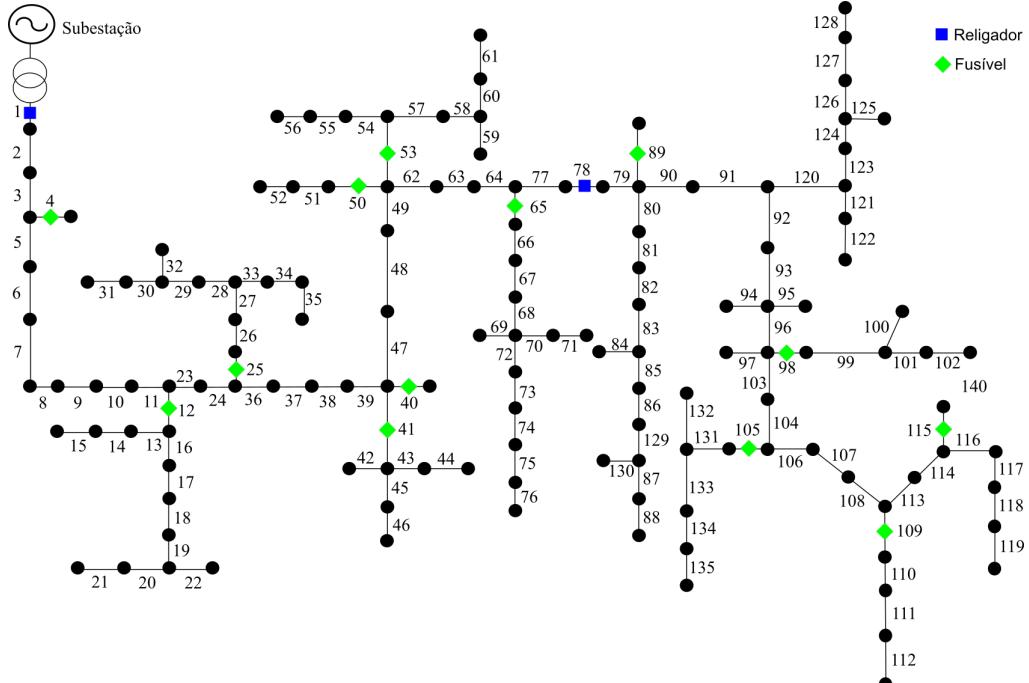
Fonte: (FERREIRA, 2013)

Em relação ao indivíduo do algoritmo genético, o "Tipo curva" poderia ser uma das três características da tabela 1. Já o td_{Re}^{50} e o td_{Re}^{51} podem variar dentro do intervalo definido, conforme os parâmetros da tabela 5, com o passo de 1 e 0,5, respectivamente. Por fim o IR (corrente de *pick-up*), pode ser uma das seguintes opções, 115%, 120% e 125% da corrente nominal.

4.1 Simulação 1

Na primeira simulação, os religadores e os fusíveis foram alocados segundo a figura 15 e os fusíveis escolhidos para esse teste estão representados na tabela 6.

Figura 15: Sistema Real de 135 Barras com os Dispositivos de Proteção



Fonte: Adaptado de (CONCEIÇÃO, 2018)

Tabela 6: Localização e Tipo dos Fusíveis Simulação 1.

Ramo de instalação do fusível	Tipo de Fusível
Ramo 4	10T
Ramo 12	80T
Ramo 25	65T
Ramo 40	8T
Ramo 41	65T
Ramo 50	65T
Ramo 53	65T
Ramo 65	65T
Ramo 89	8T
Ramo 98	8T
Ramo 105	30T
Ramo 109	25T
Ramo 115	8T

O resultado final da parametrização otimizada dos religadores está representado pelas tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Indivíduo mais adaptado Simulação 1.

Dispositivo	Ramo	Tipo de Curva	td^{51}	IR	td^{50}
Religador	1	Moderadamente inversa	1 s	115%	2
Religador	78	Extremamente inversa	0,5 s	115%	1

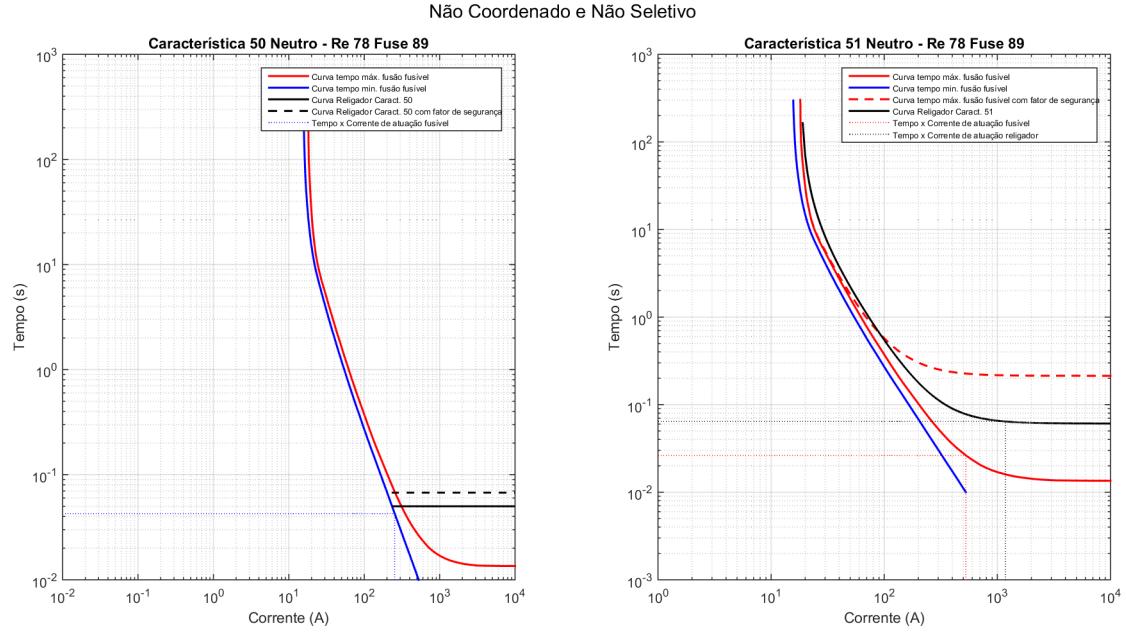
Tabela 8: Status da Coordenação e Seletividade Simulação 2.

Disp. 1 / Disp. 2	Ramo Disp. 1	Ramo Disp. 2	Tipo	Status
Religador/Religador	1	78	Neutro	Seletivo
Religador/Religador	1	78	Fase	Seletivo
Religador/Fusível	1	4	Neutro	Seletivo
Religador/Fusível	1	4	Fase	Seletivo
Religador/Fusível	1	12	Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	12	Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	25	Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	25	Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	40	Neutro	Seletivo
Religador/Fusível	1	40	Fase	Seletivo
Religador/Fusível	1	41	Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	41	Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	50	Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	50	Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	53	Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	53	Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	65	Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1	65	Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78	89	Neutro	Não Coordenado e Não Seletivo
Religador/Fusível	78	89	Fase	Não Coordenado e Não Seletivo
Religador/Fusível	78	98	Neutro	Não Coordenado e Não Seletivo
Religador/Fusível	78	98	Fase	Não Coordenado e Não Seletivo
Religador/Fusível	78	105	Neutro	Coordenado
Religador/Fusível	78	105	Fase	Coordenado
Religador/Fusível	78	109	Neutro	Coordenado
Religador/Fusível	78	109	Fase	Coordenado
Religador/Fusível	78	115	Neutro	Não Coordenado e Não Seletivo
Religador/Fusível	78	115	Fase	Seletivo

Como pode-se observar nas figuras 16 e 17, com o objetivo de minimizar o tempo de atuação dos dispositivos e garantir que a região isolada seja a menor possível a ferramenta optou por coordenar os dois religadores do sistema deixando de lado a coordenação e seletividade entre o religador do ramo 78 e o fusível do ramo 89, por exemplo. Esse resultado está de acordo com o previsto, uma vez que uma falta na região do religador do ramo 78 afetaria todo o sistema, pois o religador do ramo 1 entraria em ação primeiro. Como pode-se observar nas figuras 18 e 19 os dois religadores são seletivos tanto para característica 50 quanto para 51.

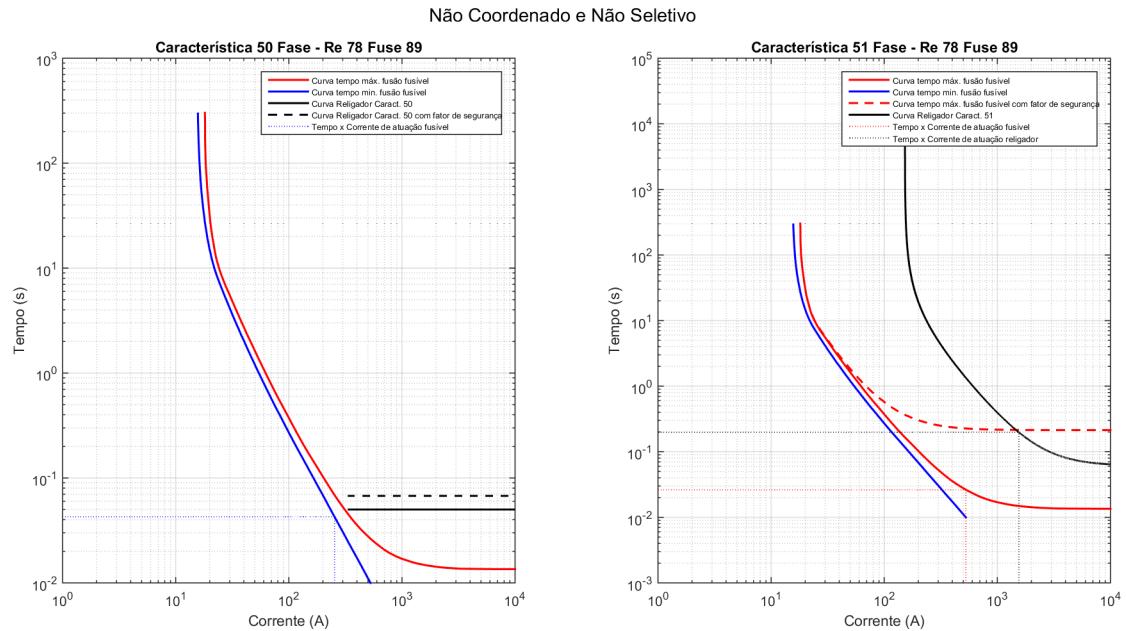
Além disso, é importante citar que, apesar do religador 78 e o fusível 89 serem seletivos, característica 51, o fator de segurança utilizado para essas simulações impossibilitou um resultado positivo.

Figura 16: Curvas Neutro Religador 78 e Fusível 89 - Simulação 1



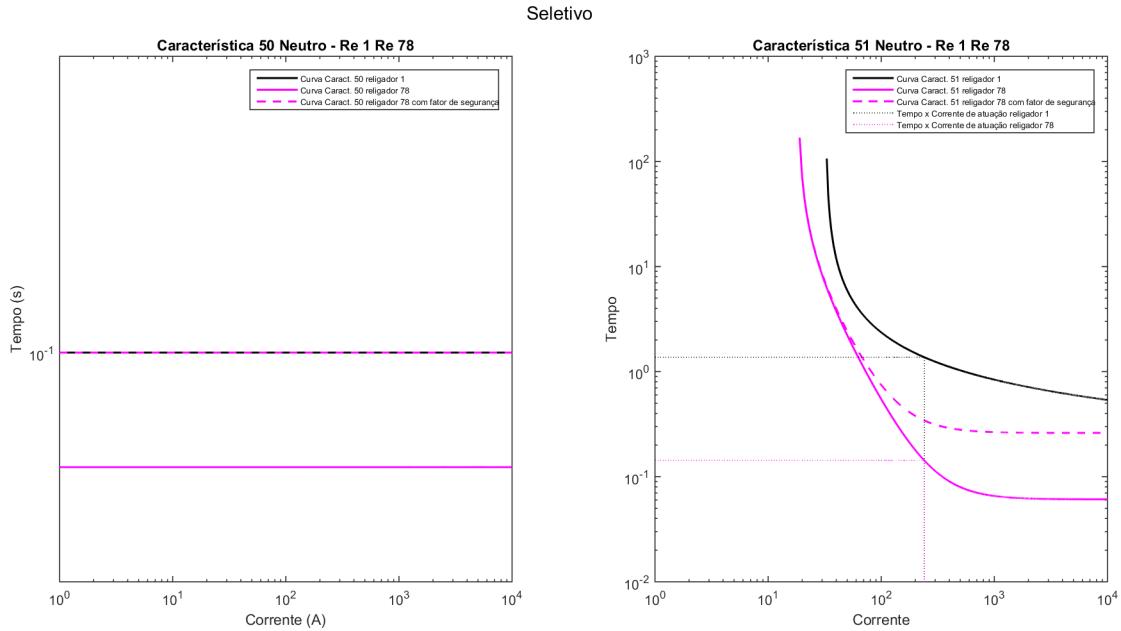
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17: Curvas Fase Religador 78 e Fusível 89 - Simulação 1



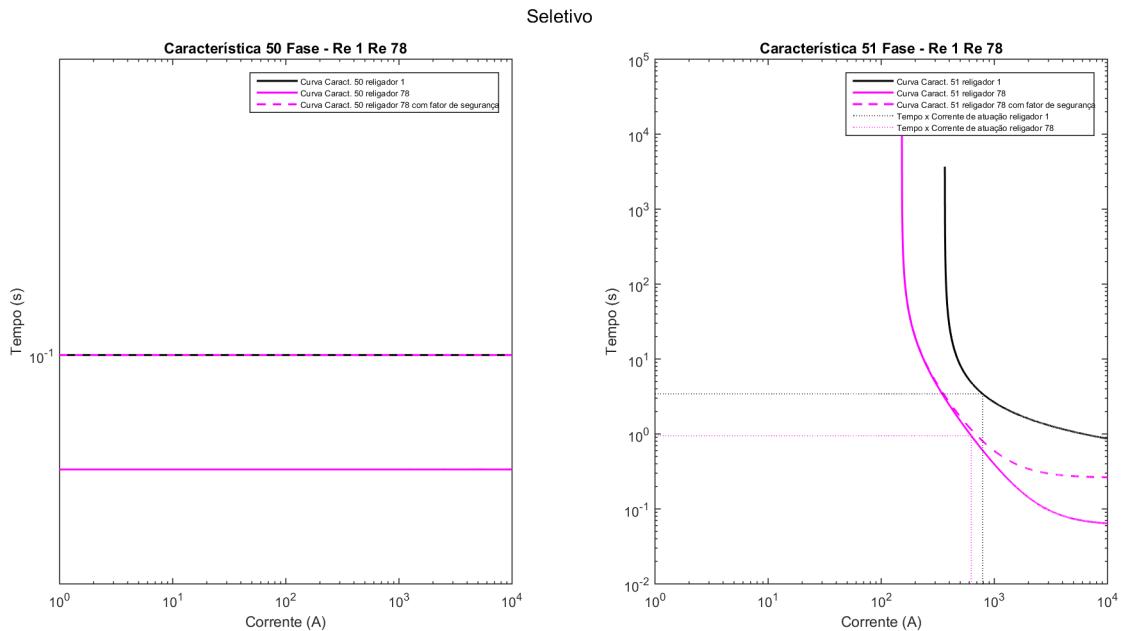
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18: Curvas Neutro Religador 1 e Religador 78 - Simulação 1



Fonte: Elaborado pelo autor

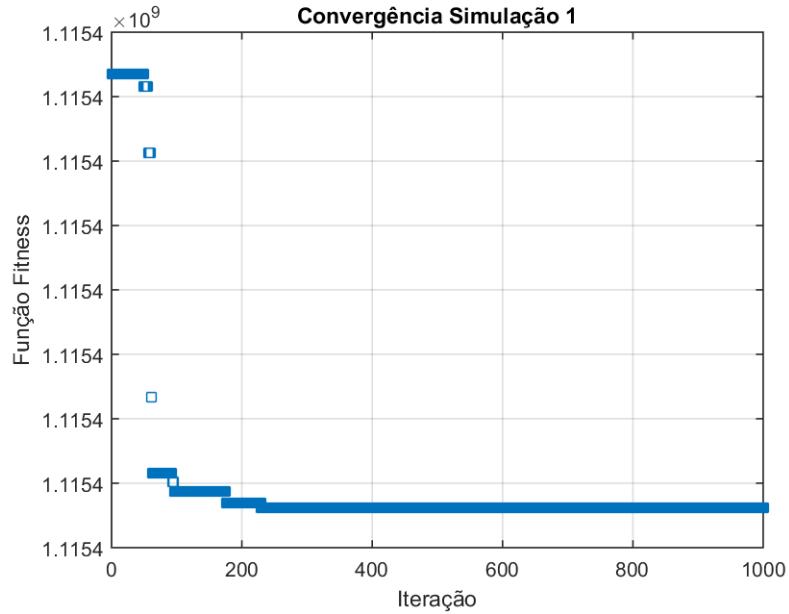
Figura 19: Curvas Fase Religador 1 e Religador 78 - Simulação 1



Fonte: Elaborado pelo autor

A curva de convergência do algoritmo genético para a Simulação 1 está indicado na figura 20.

Figura 20: Curva de convergência - Simulação 1



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Simulação 2

Para Simulação 2, os religadores e os fusíveis permanecem na mesma posição da primeira, figura 15, e os fusíveis dos ramos 4, 40, 89, 98 e 115 foram trocados com o objetivo de atender as restrições do problema. A tabela 9 indica todos os tipos dos fusíveis utilizados para essa nova topologia.

Tabela 9: Localização e Tipo dos Fusíveis Simulação 2.

Ramo de instalação do fusível	Tipo de Fusível
Ramo 4	25T
Ramo 12	80T
Ramo 25	65T
Ramo 40	15T
Ramo 41	65T
Ramo 50	65T
Ramo 53	65T
Ramo 65	65T
Ramo 89	15T
Ramo 98	15T
Ramo 105	30T
Ramo 109	25T
Ramo 115	15T

Ao fazer essas alterações, todos os equipamentos de proteção atenderam aos requi-

sitos de coordenação e seletividade. A melhor configuração encontrada para os religadores e o resultado final de todos os equipamentos estão representados nas tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10: Indivíduo mais adaptado Simulação 2.

Dispositivo	Ramo	Tipo de Curva	td^{51}	IR	td^{50}
Religador	1	Moderadamente inversa	1 s	115%	2
Religador	78	Moderadamente inversa	0,5 s	115%	1

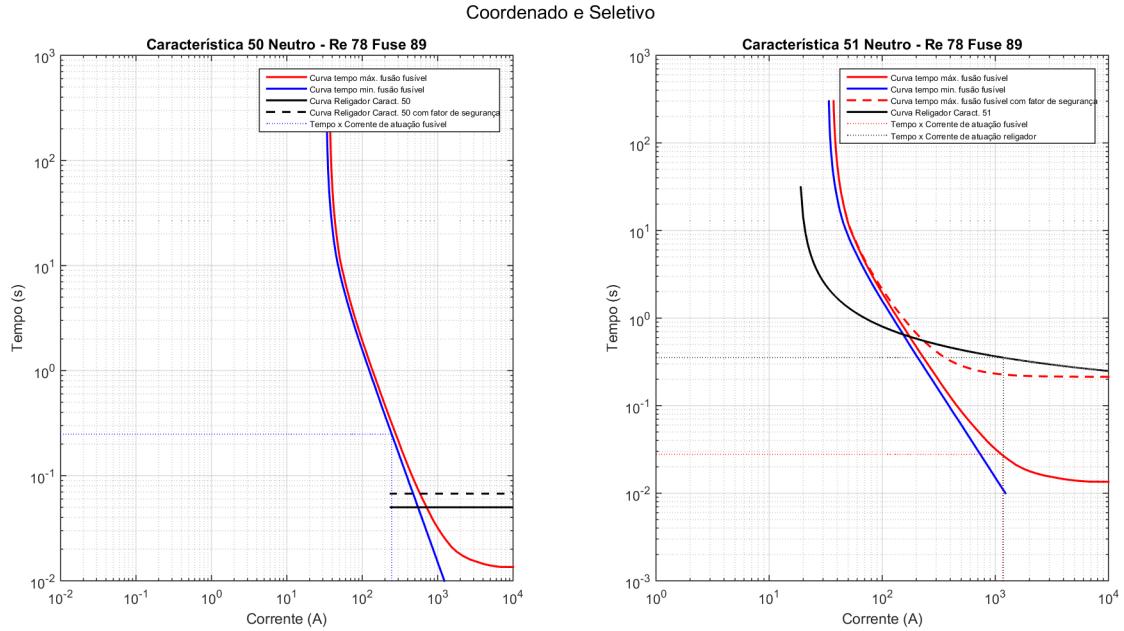
Tabela 11: Status da Coordenação e Seletividade Simulação 2.

Disp. 1 / Disp. 2	Ramo	Disp. 1	Ramo	Disp. 2	Tipo	Status
Religador/Religador	1		78		Neutro	Seletivo
Religador/Religador	1		78		Fase	Seletivo
Religador/Fusível	1		4		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		4		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		12		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		12		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		25		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		25		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		40		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		40		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		41		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		41		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		50		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		50		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		53		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		53		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		65		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	1		65		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		89		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		89		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		98		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		98		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		105		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		105		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		109		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		109		Fase	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		115		Neutro	Coordenado e Seletivo
Religador/Fusível	78		115		Fase	Coordenado e Seletivo

Como pode-se observar na tabela 11 e nas figuras 21 e 22, não só a coordenação e seletividade entre o religador do ramo 78 e o fusível do ramo 89 na nova configuração é factível, como também todo o sistema está sincronizado como pode ser observado nos

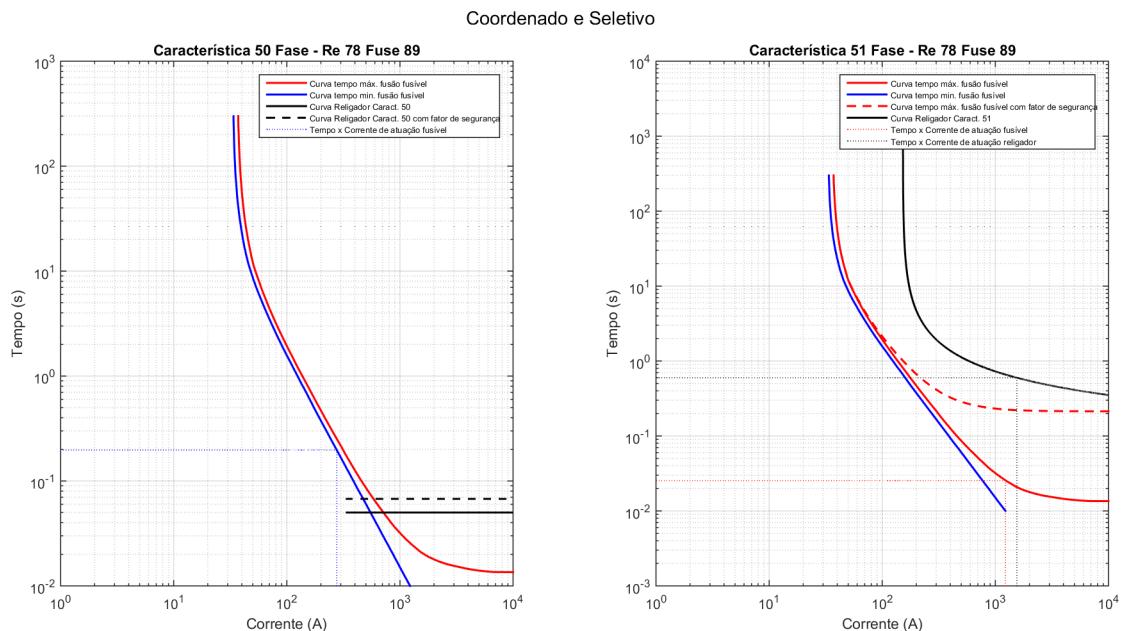
dados de saída da ferramenta representado na tabela 11. Além disso, as figuras 23 e 24 indicam que os dois religadores são seletivos tanto para característica 50 quanto para 51.

Figura 21: Curvas Neutro Religador 78 e Fusível 89 - Simulação 2



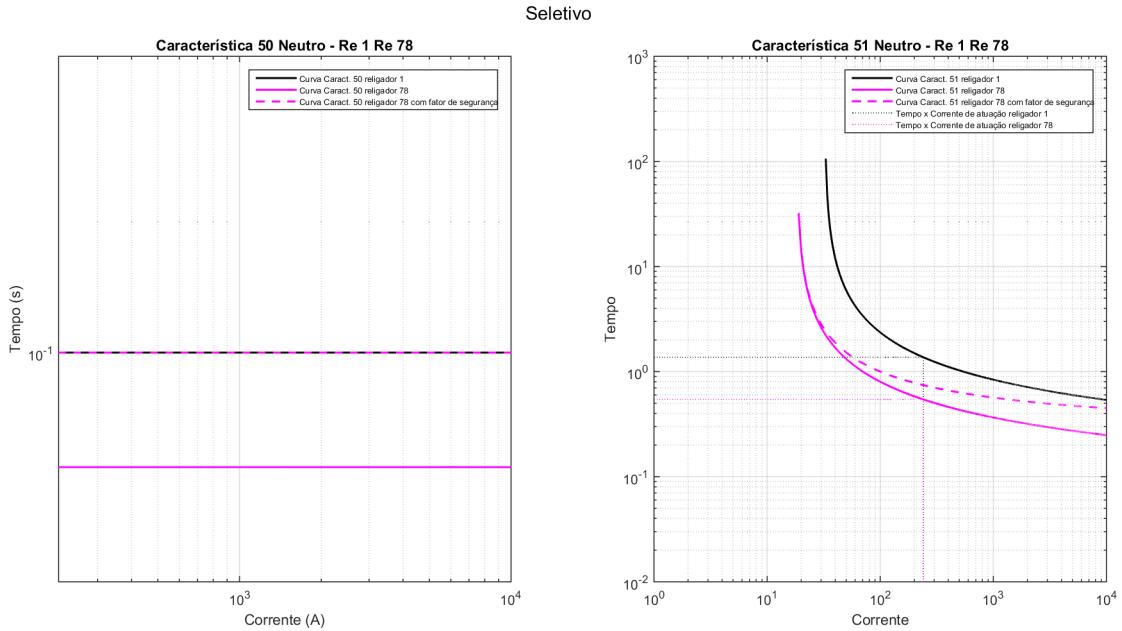
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22: Curvas Fase Religador 78 e Fusível 89 - Simulação 2



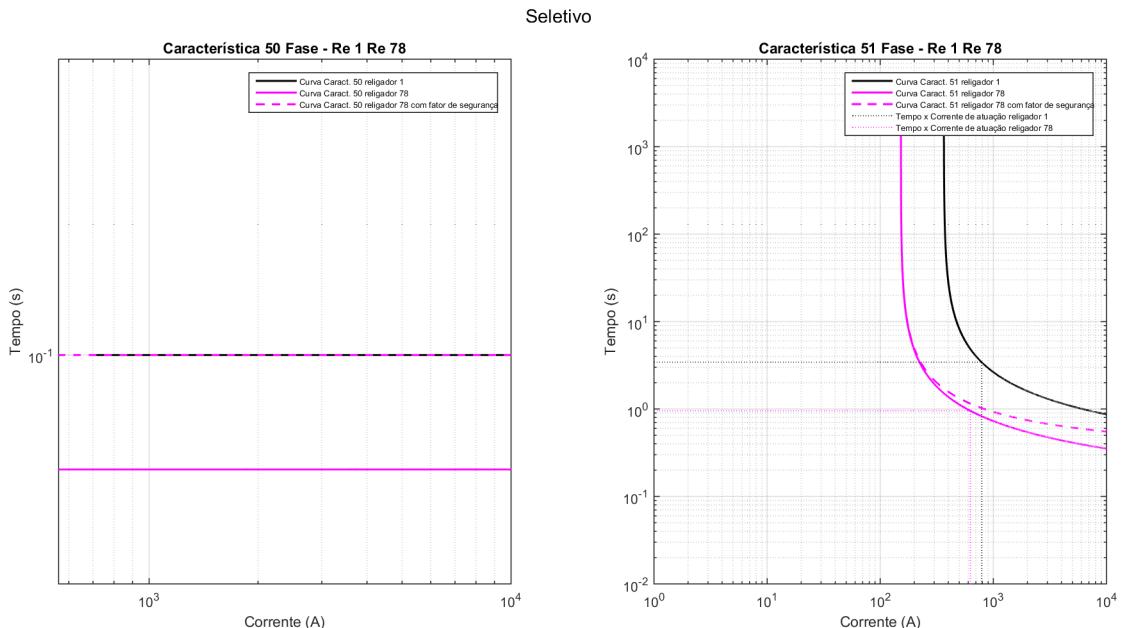
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23: Curvas Neutro Religador 1 e Religador 78 - Simulação 2



Fonte: Elaborado pelo autor

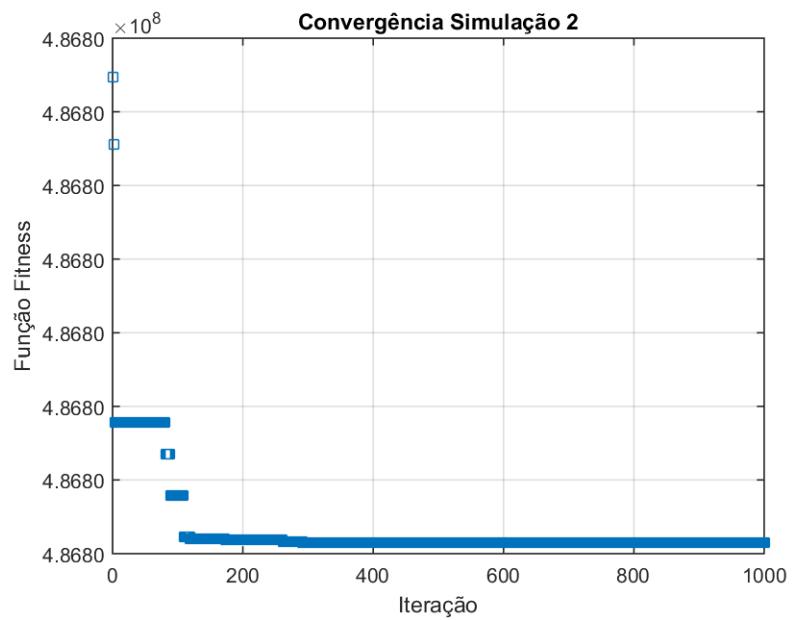
Figura 24: Curvas Fase Religador 1 e Religador 78 - Simulação 2



Fonte: Elaborado pelo autor

A curva de convergência do algoritmo genético para a Simulação 2 está indicado na figura 25.

Figura 25: Curva de convergência - Simulação 2



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÕES

A ferramenta mostrou ser simples, rápida e fácil de ser utilizada com o objetivo de não só verificar se uma combinação entre religadores e fusíveis é factível, ou seja, todos os dispositivos são coordenados e seletivos, como também a melhor configuração para ser utilizada nos religadores presentes no sistema, buscando sempre a coordenação e seletividade mais rápida e com o maior número de dispositivos possível.

A melhoria nos índices de confiabilidade cada vez mais desafiadores é um dos benefícios que essa técnica pode trazer do ponto de vista das concessionárias de distribuição, uma vez que essa técnica visa isolar menor área possível do sistema na ocorrência de uma falta. Além disso, como o objetivo é minimizar o tempo de operação dos dispositivos presentes na topologia do sistema de distribuição, ela aumenta a eficiência da utilização dos religadores do sistema. Uma possível utilização seria utilizar a ferramenta para observar qual será a parametrização mais eficiente quando a posição dos dispositivos já é conhecida ou quando deseja-se testar uma nova topologia para o sistema.

Assim sendo, é possível concluir que a ferramenta funciona de acordo com o que foi proposto anteriormente, calcular a melhor configuração para os religadores presentes no sistema elétrico visando garantir a coordenação e seletividade com os outros equipamentos de proteção no menor tempo possível.

Alguns aspectos que não foram abortados nessa metodologia que poderiam ser desenvolvidos em trabalhos futuros seriam:

- Utilizar a representação nó-profundidade (DELBEM, A. C. et al., 2004) para que a ferramenta possa funcionar com qualquer topologia, sem restrições nos nomes dos nós e ramos. Na técnica atual, sistema deve ser montado considerando o nome do ramo sendo igual à barra ligada ao final dele.
- Incluir geração distribuída de fontes renováveis na rede de distribuição. Essa tecnologia está cada vez mais presente no dia-a-dia da sociedade moderna e é muito importante descobrir quais os impactos que elas causam no sistema. Os fusíveis tipo T foram escolhidos para fazer a simulação dessa ferramenta já prevendo a inclusão futura de geração distribuída no sistema.
- Adicionar outros tipos de equipamentos de proteção e avaliar a coordenação e seletividade com os religadores e fusíveis para representar de forma mais precisa um sistema de distribuição real.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) - Módulo 8.** 2016.

ANDERSON, P. M. **Power system protection.** [S.l.]: Wiley, 1998.

BENMOUYAL, G. et al. Ieee standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 14, n. 3, p. 868–872, 1999.

CONCEIÇÃO, K. P. Uma nova metodologia para o desenvolvimento de projetos de proteção de redes ativas de distribuição de energia elétrica. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2018.

DELBEM, A. C. et al. Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design. In: SPRINGER. **Genetic and Evolutionary Computation Conference.** [S.l.], 2004. p. 678–687.

FERREIRA, G. D. Modelos matemáticos para otimização da confiabilidade de sistemas elétricos de distribuição com geração distribuída. 2013.

FUSES, F. **SMD/SMU-20 Power Fuses/Distribution.** Acessado em: 22/10/2019. Disponível em: <<https://sandcfuses.powerfuse.com/product-category/smd-smu-20-power-fuses-distribution/page/10/>>.

GUARDA, F. G. K. et al. Hybrid method for protective devices placement, sizing and coordination in electric distribution systems. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 15, n. 2, p. 257–262, 2017.

HAJIVAND, M. et al. Optimal recloser placement by binary differential evolutionary algorithm to improve reliability of distribution system. **International Journal of Information, Security and Systems Management**, Islamic Azad University E-Branch, v. 3, n. 2, p. 345–349, 2014.

HASHEMI, S. M. et al. A genetic algorithm approach to optimal placement of switching and protective equipment on a distribution network. **J Eng Appl Sci**, v. 11, p. 1395–1400, 2016.

HOLLAND, J. H. et al. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.** [S.l.]: MIT press, 1992.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. IEEE. **Std C37.2-1996(R2001): IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations.** 1996.

_____. **Std.C37.112: IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays.** 2018.

IZADI, M. et al. Optimal placement of protective and controlling devices in electric power distribution systems: A mip model. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 122827–122837, 2019.

- JONG, K. A. D. Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. 1975.
- JÚNIOR, P.; RODRIGUES, B. Alocação otimizada de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica através de metaheurísticas multiobjetivo. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2009.
- KONDO, D. V. **Alocação de relígadores automatizados em sistemas de distribuição**. 2015. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2015.
- NOJAVAN, M. et al. Optimization of fuse-recloser coordination and dispersed generation capacity in distribution systems. **Majlesi Journal of Electrical Engineering**, v. 8, n. 3, p. 15–24, 2014.
- PREGELJ, A.; BEGOVIC, M.; ROHATGI, A. Recloser allocation for improved reliability of dg-enhanced distribution networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 21, n. 3, p. 1442–1449, 2006.
- RAIMANN, E. et al. Geração de rotas urbanas virtuais usando algoritmos genéticos. Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- SIEMENS. **Siemens Vacuum Recloser 3AD**. 2018. Acessado em: 30/07/2019. Disponível em: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/systems/outdoor-systems/vacuum-recloser.html>.
- SILVA, L. G. W. D.; PEREIRA, R. A. F.; MANTOVANI, J. R. S. Optimized allocation of sectionalizing switches and control and protection devices for reliability indices improvement in distribution systems. In: IEEE. **2004 IEEE/PES Transmision and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956)**. [S.l.], 2004. p. 51–56.
- TENG, J.-H.; LIU, Y.-H. A novel acs-based optimum switch relocation method. **IEEE transactions on power systems**, IEEE, v. 18, n. 1, p. 113–120, 2003.
- WANG, L.; SINGH, C. Reliability-constrained optimum placement of reclosers and distributed generators in distribution networks using an ant colony system algorithm. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)**, IEEE, v. 38, n. 6, p. 757–764, 2008.
- YOUSAF, M.; MAHMOOD, T. Protection coordination for a distribution system in the presence of distributed generation. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, The Scientific and Technological Research Council of Turkey, v. 25, n. 1, p. 408–421, 2017.