



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Otimização de Ajustes de Relés Direcionais de Sobrecorrente em Linhas de Subtransmissão em Anel

Dissertação de Mestrado
Marcos Vinícius Santana Campos



São Cristóvão – Sergipe

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Marcos Vinícius Santana Campos

Otimização de Ajustes de Relés Direcionais de Sobrecorrente em Linhas de Subtransmissão em Anel

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Dr. George Victor Rocha Xavier

São Cristóvão – Sergipe

2025

Marcos Vinícius Santana Campos
C198o Otimização de Ajustes de Relés Direcionais de Sobrecorrente em Linhas
de Subtransmissão em Anel/ Marcos Vinícius Santana Campos. – São Cristóvão –
Sergipe, 2025-
117 p. : il.

Orientador: Dr. George Victor Rocha Xavier

Dissertação de Mestrado – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2025.

1. Engenharia elétrica. 2. Relés elétricos. 3. Otimização matemática. 3. Linhas
de transmissão de microondas. I. Xavier, George Victor Rocha, Dr.

CDU 621.316.925



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA-PROEE**

TERMO DE APROVAÇÃO

**“Otimização de Ajustes de Relés Direcionais de Sobrecorrente
em Linhas de Subtransmissão em Ane”**

Discente:

Marcos Vinícius Santana Campos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada pela banca examinadora composta por:



Documento assinado digitalmente
TARSO VILELA FERREIRA
Data: 22/08/2025 10:44:05-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

**Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira (PROEE/UFS)
Presidente**



Documento assinado digitalmente
ANDRÉA ARAUJO SOUSA
Data: 25/08/2025 16:49:35-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

**Profa. Dra. Andréa Araujo Sousa (DEL/UFS)
Examinadora Interna**



Documento assinado digitalmente
KLEBER MELO E SILVA
Data: 29/08/2025 12:17:16-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

**Prof. Dr. Kleber Melo e Silva (UnB)
Examinador Externo**



Documento assinado digitalmente
MARCOS VINÍCIUS SANTANA CAMPOS
Data: 29/08/2025 14:13:48-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

**Marcos Vinícius Santana Campos
Discente**

Cidade Universitária “Prof. José Aloísio de Campos”, 21 de agosto de 2025.

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus digno de toda a honra e glória, por me conceder a vida e a sabedoria para trilhar em todos os caminhos, à minha mãe Vera Lúcia e ao meu filho Renato Vinícius por serem a razão da minha vida.

A minha parceira Danielle Cristina, por ser companheira, amiga e confidente, buscando atingir objetivos em comum e estando comigo em todos os momentos ao longo do curso e do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. George Victor Rocha Xavier pela paciência, dedicação, participação e incentivo para o desenvolvimento e realização deste trabalho.

Aos professores, Dr. Jugurta Rosa Montalvão Filho, Dr. Douglas Bressan Riffel, Dr. Tarso Vilela Ferreira e Dra. Andréa Araújo Sousa, por serem exemplos de mestres e pela excelente conduta em sala de aula.

Ao formando do curso de Engenharia Elétrica, Dijalma Dantas Pinheiro Neto pela parceria e apoio na confecção e publicação do artigo no SENDI 2025.

Agradeço à Energisa Sergipe, pela oportunidade de fazer parte de sua excelente equipe de colaboradores, além da disponibilidade dos dados e ferramentas computacionais necessários para validação dos resultados obtidos nesta pesquisa, além da compreensão quando da necessidade de cumprimento das disciplinas durante o expediente.

A todos, muito obrigado!

Queira

Basta ser sincero e desejar profundo

Você será capaz de sacudir o mundo

Vai, tente outra vez

Tente

E não diga que a vitória está perdida

Se é de batalhas que se vive a vida

Tente outra vez

(Raul Seixas/Paulo Coelho)

Resumo

A utilização de um estudo de otimização de ajuste é de extrema importância no processo de parametrização de relés de sobrecorrente, sendo assim, uma ferramenta de apoio à tomada de decisão do engenheiro de proteção responsável pela elaboração do estudo de coordenação de proteção, tornando o estudo preciso e rápido. Nesta dissertação, buscou-se a coordenação otimizada de relés de sobrecorrente direcionais instalados em linhas de transmissão em sistemas malhados. Para tanto, foi desenvolvida uma ferramenta computacional na plataforma *Scilab* utilizando o algoritmo PSO - *Particle Swarm Optimization*. As principais funcionalidades da aplicação são: (i) cálculo automático das condições de curto-circuito (em barras e *close-in* em linhas), (ii) determinação das restrições a serem atendidas, (iii) determinação automática da Função Objetivo a ser minimizada, (iv) otimização das curvas das famílias IEC e IEEE. A técnica de otimização proposta trouxe resultados promissores, cujos tempos de eliminação de faltas foram satisfatórios e atenderam todas as restrições impostas pelo sistema analisado, além de garantir a eliminação do defeito em todas as etapas de atuação dos relés de proteção, sem comprometer a seletividade desejada.

Palavras-chave: Otimização por Enxame de Partículas, Relé de Sobrecorrente Direcional, Linhas de Transmissão.

Abstract

The use of a tuning optimization study is extremely important in the process of parameterizing overcurrent relays, and is therefore a tool to support the decision-making of the protection engineer responsible for preparing the protection coordination study, making the study accurate and fast. In this dissertation, the aim was to optimize the coordination of directional overcurrent relays installed on transmission lines in meshed systems. To this end, a computational tool was developed on the *Scilab* platform using the PSO - *Particle Swarm Optimization* algorithm. The main functionalities of the application are: (i) automatic calculation of short-circuit conditions (on buses and *close-in* on lines), (ii) determination of the restrictions to be met, (iii) automatic determination of the Objective Function to be minimized, (iv) optimization of the curves of the IEC and IEEE families. The proposed optimization technique yielded promising results, with satisfactory fault clearance times that met all restrictions imposed by the analyzed system, in addition to ensuring the elimination of the defect in all stages of protective relay operation, without compromising the desired selectivity.

Keywords: Particle Swarm Optimization, Directional Overcurrent Relay, Transmission Lines.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema de Proteção	26
Figura 2 – Coordenograma de atuação e bloqueio de um relé de sobrecorrente	26
Figura 3 – Curvas características de tempo inverso Norma IEC	28
Figura 4 – Efeitos do ajuste de corrente (a) e do ajuste de tempo (b) na curva.	29
Figura 5 – Curvas NI da norma IEC de variando o ajuste do DTS e man- tendo fixo o valor do I_p	29
Figura 6 – Curvas inversas padrão ANSI	31
Figura 7 – Curvas inversas padrão IEC	33
Figura 8 – Curva de atuação de um relé de sobrecorrente de tempo definido.	34
Figura 9 – Sistemas Transmissão em anel com duas Linhas	37
Figura 10 – Diagrama fasorial de um relé direcional	39
Figura 11 – Representação unifilar simplificada do relé direcional de sobre- corrente	39
Figura 12 – Relés direcionais aplicados a um sistema em malha	40
Figura 13 – Circuito equivalente no Curto-circuito 3ϕ	42
Figura 14 – Modelos em Paralelo no Curto-circuito 2ϕ	43
Figura 15 – Modelos em Série no Curto-circuito 1ϕ -terra	45
Figura 16 – Modificação de Z_{barra} Caso 1	47
Figura 17 – Modificação de Z_{barra} Caso 2	48
Figura 18 – Modificação de Z_{barra} Caso 3	49
Figura 19 – Modificação de Z_{barra} Caso 4	51
Figura 20 – <i>Software</i> utilizados na elaboração/validação do algoritmo. . . .	67
Figura 21 – Rede modelo usada no desenvolvimento do algoritmo	68
Figura 22 – Fluxograma do algoritmo de otimização	69
Figura 23 – Sistema elétrico malhado de 4 barras/6 Linhas/12 relés	71
Figura 24 – Destaque dos relés não otimizados na rede modelo	81
Figura 25 – Curto-circuito 3ϕ na Barra 02.	83
Figura 26 – Curto-circuito 3ϕ na Barra 03.	84

Figura 27 – Curto-circuito 3ϕ na Barra 04.	84
Figura 28 – Curto-circuito 3ϕ <i>close-in</i> no terminal Disjuntor 07.	85
Figura 29 – Curto-circuito 3ϕ <i>close-in</i> no terminal Disjuntor 02.	86
Figura 30 – Curto-circuito 3ϕ <i>close-in</i> no terminal Disjuntor 03.	86
Figura 31 – Curto-circuito 3ϕ <i>close-in</i> no terminal Disjuntor 10.	87
Figura 32 – Curto-circuito 3ϕ <i>close-in</i> no terminal Disjuntor 05.	88
Figura 33 – Curto-circuito 3ϕ <i>close-in</i> no terminal Disjuntor 12.	88
Figura 34 – Curto-circuito 3ϕ na Barra 02.	90
Figura 35 – Curto-circuito 3ϕ na Barra 03.	91
Figura 36 – Curto-circuito 3ϕ na Barra 04.	91
Figura 37 – Curvas otimizadas do Relés da Rede Modelo	98
Figura 38 – Coordenação dos Relés p/ os casos 01, 02, 14 e 15 da Rede Modelo	100

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros A, B e α para as curvas inversas padrão ANSI	30
Tabela 2 – Parâmetros A, B e α para as curvas inversas padrão IEC	32
Tabela 3 – Síntese da revisão bibliográfica.	65
Tabela 4 – Tabela de dados da rede modelo.	70
Tabela 5 – Lista de pares de relés da rede modelo (Total 20 pares)	72
Tabela 6 – Restrições do sistema modelo.	92
Tabela 7 – Resultado Global da Rede Modelo.	93
Tabela 8 – Casos Analisados	96
Tabela 9 – DTS Resultados da otimização.	97
Tabela 10 – Tempo de Operação para os casos de restrições.	99
Tabela 11 – Falta na Barra 02.	101
Tabela 12 – Falta na Barra 03.	102
Tabela 13 – Falta na Barra 04.	102
Tabela 14 – Falta <i>close-in</i> no relé 01.	103
Tabela 15 – Falta <i>close-in</i> no relé 02.	103
Tabela 16 – Falta <i>close-in</i> no relé 03.	104
Tabela 17 – Falta <i>close-in</i> no relé 04	113
Tabela 18 – Falta <i>close-in</i> no relé 05	114
Tabela 19 – Falta <i>close-in</i> no relé 06	114
Tabela 20 – Falta <i>close-in</i> no relé 07	115
Tabela 21 – Falta <i>close-in</i> no relé 08	115
Tabela 22 – Falta <i>close-in</i> no relé 09	116
Tabela 23 – Falta <i>close-in</i> no relé 10	116
Tabela 24 – Falta <i>close-in</i> no relé 11	117
Tabela 25 – Falta <i>close-in</i> no relé 12	117

Lista de algoritmos

1	Algoritmo de Numeração dos Relés	71
2	Montagem da Matriz de Incidência	72
3	Definição do ajuste 50P do relé	79
4	Algoritmo para testar as curvas a serem otimizadas	81
5	Algoritmo geral do otimizador	82

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AED	Algoritmo de Evolução Diferencial
AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
APSO	<i>Accelerated Particle Swarm Optimization</i>
APSO-LP	<i>Accelerated Particle Swarm Optimization-Linear Programming</i>
CAPE	<i>Computer-Aided Protection Engineering</i>
CSA	<i>Cuckoo Search Algorithm</i>
CTI	<i>Coordination Time Interval</i>
DEL	Departamento de Engenharia Elétrica
DOCR	<i>Directional Overcurrent Relay</i>
DTS	<i>Dial Time Setting</i>
EFO	<i>Electromagnetic Field Optimization</i>
FO	Função Objetivo
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GWO	<i>Grey Wolf Algorithm</i>
IA	Inteligência Artificial
IAC	<i>Inverse Alternate Current</i>

ICA	<i>Imperialistic Competition Algorithm</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMFO	<i>Improved Moth-Flame Optimization</i>
ITC	Intervalo de Tempo de Coordenação
JAYA*	*JAYA palavra sânscrita e seu significado é vitória
LF	<i>Levy Flights</i>
LT	Linha de Transmissão
LX	<i>Laplace Crossover</i>
LXPSO	<i>Laplace Crossover Particle Swarm Optimization</i>
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MEFO	<i>Modified Electromagnetic Field Optimization</i>
MFO	<i>Moth-Flame optimization</i>
MI	Matriz de Incidência
MINLP	<i>Mixed Integer Non-linear Programming</i>
NBR	Norma Brasileira Registrada
ONS	Operador Nacional do Sistema
PL	Programação Linear
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PROEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RDS	Relé Direcional de Sobrecorrente

Scilab	<i>Scientific Laboratory</i>
SDEE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica"
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SP	Sistema de Proteção
TC	Transformadores de Corrente
TMS	<i>Time Multiplier Setting</i>
TP	Transformadores de Potencial
UFS	Universidade Federal de Sergipe
I_p	Corrente de <i>pick-up</i>

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Objetivos	22
1.1.1	Objetivo Geral	22
1.1.2	Objetivos Específicos	22
1.2	Organização do texto	23
1.3	Publicação	24
2	Fundamentação Teórica	25
2.1	Sistema de Proteção	25
2.1.1	Relé de Sobrecorrente Temporizado	27
2.1.2	Relé de Sobrecorrente Instantâneo	34
2.2	Seletividade e Coordenação	35
2.3	Relés Direcional de Sobrecorrente	37
2.4	Modelagem de Faltas	40
2.4.1	Modelo para Curto-Circuito 3ϕ	41
2.4.2	Modelo para Curto-Circuito 2ϕ	43
2.4.3	Modelo para Curto-Circuito 1ϕ	45
2.4.4	Cálculo Matricial de Curto-circuito	46
2.5	Otimização - Introdução	51
2.5.1	PSO	53
3	Revisão Bibliográfica	56
3.1	Resumo da Revisão Bibliográfica	63
4	Formulação do problema e algoritmo proposto	66
4.1	Tratamento dos dados de rede	70
4.2	Visão geral do algoritmo	73
4.2.1	Funções <i>Fitness</i> , Objetivo e Penalidades	73
4.2.2	Variáveis de Controle	76
4.2.3	Variáveis de aplicação	77

4.3	Locais de Faltas simuladas	83
4.3.1	Curto-circuito nas Barras	83
4.3.2	Curto-circuito <i>Close-in</i> nas Linhas	85
5	Discussão dos resultados	89
5.1	Resultados da Rede Modelo	89
5.1.1	Curvas do Relé com melhor resultado	95
5.1.1.1	Análise da eliminação de falta	101
6	Conclusões	105
6.1	Sugestão para futuros trabalhos	106
	Referências	108
	Apêndices	112
	APÊNDICE A Análise da eliminação de falta	113

1

Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) agrega toda a estrutura necessária para fornecimento de energia elétrica, sendo dividido em três subsistemas: geração, transmissão e distribuição. Para assegurar a qualidade do serviço prestado ao consumidor, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), que visa dentre outros objetivos, garantir que operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade. Para atender a esses requisitos, a ANEEL estabeleceu parâmetros a serem adotados pelas concessionárias, dos quais os indicadores de continuidade de serviço figuram dentre os mais importantes, visto que avaliam as interrupções no fornecimento de energia elétrica, as quais afetam diretamente o cotidiano da população e geração de receita para o país ([PEREIRA, 2021](#)).

Os indicadores de continuidade, entre outros fatores, dependem da qualidade do Sistema de Proteção (SP), definido como sendo o sistema composto por relés de proteção, disjuntores e por instrumentos transformadores (transformadores de potencial (TP) e transformadores de corrente (TC)). O dispositivo de proteção principal é destinado a detectar e eliminar falhas que ocorram no componente protegido e fornecer proteção adicional para os componentes adjacentes. Sua atuação

deve ser coordenada com a atuação das proteções dos equipamentos adjacentes por meio de retardo de tempo intencional (ONS, 2023). Assim, o sistema de proteção tem como função principal eliminar o evento de defeito, de modo a mitigar o risco a terceiros, preservar os equipamentos elétricos e manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica para o máximo possível de consumidores.

Dessa forma, os dispositivos de proteção deverão ser sensíveis para detectar os diversos tipos de falhas possíveis para cada evento do SEP, sendo instalados em locais que permitam reduzir o alcance da região afetada pelo distúrbio com uma atuação rápida, evitando assim que os equipamentos submetidos à falta sejam desligados antes que haja comprometimento de sua integridade física. Para atender tais objetivos, é fundamental dotar o SP de alguns requisitos para garantia da boa operação. Dentre este requisitos, pode-se destacar (SILVA, 2014):

- Confiabilidade, onde o dispositivo deve atuar de acordo com o esperado.
- Rapidez, onde o dispositivo deve operar o mais rápido possível para garantir o isolamento da falta e evitar oscilação de potência.
- Seletividade, onde o dispositivo deve isolar apenas a região onde a falta acontece.
- Economia e simplicidade, onde o dispositivo deverá atender às necessidades do SEP de forma simples, segura, contendo as funções básicas necessárias para operação e ajustes de forma prática, sem que se torne um item caro ao projeto.

A proteção de sistemas elétricos de potência é constituída por uma infraestrutura complexa que contém diversos dispositivos que devem estar aptos a detectar, selecionar e isolar qualquer distúrbio nele manifestado. Num sistema de proteção confiável, os vários dispositivos e subsistemas que o integram devem apresentar funcionamento organizado e respeitar a hierarquia de funcionamento estabelecida entre os mesmos, de modo a garantir rapidez na resposta para retornar o sistema às suas condições normais de operação (BERNARDES, 2013b).

Quando o sistema elétrico é de grande porte e não radial, um simples relé de sobrecorrente não é capaz de promover a proteção adequada conforme estabelecido na filosofia de proteção exposta anteriormente. Isso se deve a maior complexidade na coordenação entre os elementos neste tipo de sistema, visto que, durante a ocorrência de uma falta, podem existir reversões no sentido da corrente e com diferentes níveis de contribuição oriundas de cada um dos terminais do sistema a depender dos pontos de falta. Assim, faz-se necessário o uso da proteção direcional de sobrecorrente, a qual será sensibilizada somente em um dos sentidos do fluxo de corrente, permitindo sensibilizar esse tipo de proteção somente para algumas situações de falta dentro do sistema em anel, segmentando e facilitando a coordenação entre dispositivos para cada conjunto de ocorrências. No entanto, ainda assim, definir os ajustes necessários aos relés envolvidos nesse tipo de sistema não é uma tarefa trivial. Para ajustar o relé direcional de sobrecorrente, é necessário obter os ajustes de múltiplo de tempo¹, corrente de *pick-up*² e o tipo de curva do relé (Adaptado de (SOUZA, 2019)).

Apesar das suas reconhecidas vantagens, a etapa de parametrização dos relés de sobrecorrente pode se tornar uma tarefa ainda mais complexa, principalmente quando cresce o número desses equipamentos ou do número de malhas do sistema. Neste contexto, a análise do estado da arte mostrou que um dos maiores problemas enfrentados pelos especialistas em proteção é a busca pelos melhores ajustes dos relés. Na prática, o problema consiste em obter o ajuste dos parâmetros que assegure o atendimento aos requisitos básicos da filosofia de proteção, ou seja, confiabilidade, sensibilidade, velocidade e seletividade (PEREIRA, 2021).

Diante da complexidade envolvida, o ajuste de relés de distância e de sobrecorrente direcionais em sistemas malhados exige o emprego de ferramentas de apoio, mais especificamente, de programas computacionais para este propósito. O uso desses programas tem contribuído significativamente para tornar o processo de ajuste mais eficiente. Mesmo assim, o número de informações necessárias para efetuar um estudo de proteção é grande e cresce à medida em que aumenta a complexidade do sistema elétrico sob estudo (Adaptado de (MORO, 2014)).

¹ Multiplicador para definição do tempo de atuação do relé.

² Corrente de ajuste para relés de tempo inverso.

Um dos problemas decorrentes do uso de relés de sobrecorrente diz respeito a sua coordenação, que visa obter a configuração ótima, de modo que as faltas sejam extintas rapidamente em qualquer que seja o local de sua ocorrência no sistema, mesmo quando o relé mais próximo ao ponto defeituoso venha a falhar (FAGUNDES, 2020).

De fato, diante do exposto, afirma-se que o problema de parametrização resultante da análise das informações supracitadas é de difícil solução, cuja complexidade aumenta à medida em que o sistema elétrico a ser analisado cresce em tamanho, número de equipamentos e dispositivos de proteção (BOTTURA, 2014).

Esse é um problema típico de otimização e que constitui uma área de pesquisa tradicional da área de sistemas de potência. Atualmente, ela vem despertando interesse renovado dos pesquisadores, haja visto o aumento da complexidade dos SEP. Resumidamente, um problema de otimização consiste em buscar, se possível, os minimizadores ou maximizadores de uma função definida em uma determinada região. Dentre as vertentes que vêm sendo conduzidas, destacam-se o uso de métodos de otimização baseados em meta heurística para realizar a coordenação dos tempos de atuação dos relés de sobrecorrente. A maioria desses trabalhos tem como objetivo principal a minimização da soma dos tempos de atuação dos relés, respeitando um intervalo de tempo da atuação entre os que estão mais próximos da falta (principal) e os respectivos relés de retaguarda (PEREIRA, 2021).

Nos estudos operacionais desenvolvidos pelas empresas Distribuidoras e/ou Transmissoras de Energia Elétrica, são analisados diversos casos de simulação de faltas no sistema elétrico, tanto em relação a natureza das faltas (curto-circuitos trifásicos, bifásicos, monofásicos-terra), quanto a localização das mesmas (Barramentos, Linhas de transmissão, Transformadores, etc). Essas simulações são realizadas tanto para a configuração normal do sistema, quanto para as configurações de contingências, onde a perda de uma Linha de Transmissão (LT) resulta em uma alteração nos níveis das correntes de falta, o que pode exigir que novos ajustes sejam estudados, adequando o sistema de proteção a cada configuração da rede. Outro ponto importante a ser destacado é que durante a análise de coordenação de atuação da proteção, a dinâmica de atuação da proteção resulta em uma configuração intermediária (em função da abertura dos primeiros terminais) sem que ainda

tenha chegado a eliminação total da falta. Isso exige que essas etapas de atuação sejam devidamente checadas durante a fase de atuação dos relés, pois as alterações substanciais nas correntes de curto-circuito nos terminais remanescentes podem levar o sistema a uma condição indesejada de descoordenação.

Portanto, o emprego de um estudo de otimização de ajustes é de extrema importância no processo de parametrização dos relés de sobrecorrente, visto que o método tradicional de estudos de coordenação e seletividade de sistemas de proteção não englobam, com a devida eficácia, todas as condições de contingência para os casos analisados.

Dessa forma, neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um método para determinar a coordenação otimizada entre os relés de sobrecorrente direcionais, de forma a garantir a seletividade entre os equipamentos envolvidos nas faltas. Assim, espera-se obter uma ferramenta de apoio à tomada de decisão do engenheiro de proteção responsável por elaborar o estudo de coordenação da proteção, tornando-o mais preciso e mais rápido.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a implementação de um algoritmo de otimização por enxame de partículas para obter os parâmetros de configuração das curvas dos relés de sobrecorrente, resultando em uma solução otimizada que apresente os menores tempos de atuação e garanta a coordenação entre os relés para todas as situações de contingência avaliadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como forma de atingir o objetivo principal deste trabalho, também foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Construir no algoritmo de otimização uma etapa de cálculo das correntes de curto-circuito a partir de uma matriz com dados de linhas transmissão;

- Definir uma verificação automática de todos os pares de relés que deverão ser coordenados para qualquer sistema que seja analisado;
- Desenvolver rotinas computacionais específicas para identificação da função objetivo, restrições a serem superadas e função de penalidade no processo de otimização;
- Propor no método de otimização (PSO) a utilização de variáveis de controle que garantam otimização do sistema para todos os curtos-circuitos analisados;
- Obter a solução do problema de coordenação dos relés sobrecorrente direcionais de tempo inverso da norma *International Electrotechnical Commission* (IEC), com as cinco curvas de tempo inversa desta norma, além de obter a coordenação para curvas temporizadas padronizadas pelo *American National Standards Institute* (ANSI);
- Verificar o resultado do processo de otimização (PSO) para condições de curto-circuito no sistema em análise e verificando passo a passo a coordenação dos relés até a eliminação total do curto-circuito.

1.2 Organização do texto

O trabalho aqui apresentado foi organizado em seis capítulos, incluindo este introdutório. Os demais capítulos desse trabalho estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2: Apresentação dos fundamentos teóricos e gerais a respeito dos sistemas de proteção, critérios e conceitos sobre relés de sobrecorrente (temporizado e instantâneo), bem como definições de seletividade e coordenação. Neste capítulo, também são abordados os principais conceitos acerca do relé 67 (direcional), os tipos de curto-circuito (fundamentação e modelo matricial), além dos conceitos sobre o algoritmo empregado na pesquisa, o Otimização por Enxame de Partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*).
- Capítulo 3: Revisão da literatura sobre otimização de ajustes de relés de sobrecorrente direcionais em sistemas malhados ou não.

- Capítulo 4: Apresentação da formulação do problema e do algoritmo proposto, com destaque para as funções *fitness*, objetivo e penalidades, além da abordagem sobre as variáveis de controle empregadas no código-fonte do algoritmo desenvolvido.
- Capítulo 5: Apresentação e discussão dos resultados. As soluções obtidas são detalhadas e comentadas.
- Capítulo 6: São apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1.3 Publicação

Em decorrência deste trabalho, foram produzidos dois artigos, ambos com publicação aceita, sendo um artigo no Seminário Nacional de Distribuição – SENDI 2025 ([CAMPOS; XAVIER; NETO, 2025](#)) e outro artigo na Revista de Engenharia e Tecnologia ([CAMPOS; XAVIER, 2025](#)).

2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo são exploradas a teoria sobre proteção em linhas de transmissão utilizando relé direcional de sobrecorrente. Ainda é descrito o funcionamento da coordenação dos relés direcionais de sobrecorrente, os tipos de faltas (curto-circuitos) e os métodos de otimização que serão abordados neste trabalho.

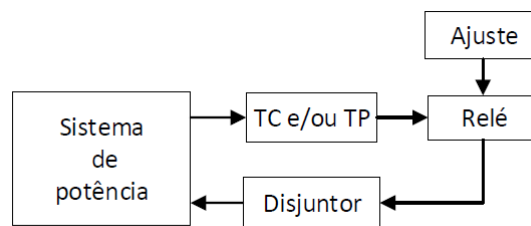
2.1 Sistema de Proteção

No sistema de proteção em linhas de transmissão, as grandezas elétricas (corrente e tensão) são monitoradas em tempo real por meio dos transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP). Estas grandezas são enviadas ao relé que, por sua vez, monitora e toma as decisões a partir de algoritmos internos. O relé atua quando os valores monitorados excedem o que está predeterminado nos algoritmos, solicitando a abertura do disjuntor. Na Figura 1 é ilustrado o sistema de proteção com os dispositivos/equipamentos que o compõem (SOUZA, 2019).

Os relés podem ser classificados de acordo com sua função principal, como por exemplo, relés de sobrecorrente, diferenciais e distância. Diante do escopo desta pesquisa, este trabalho terá como foco os dispositivos com funções de sobrecorrente.

Os relés de sobrecorrente respondem à amplitude das correntes do circuito, ou seja, se a corrente de falta for superior à corrente de projeto (corrente de

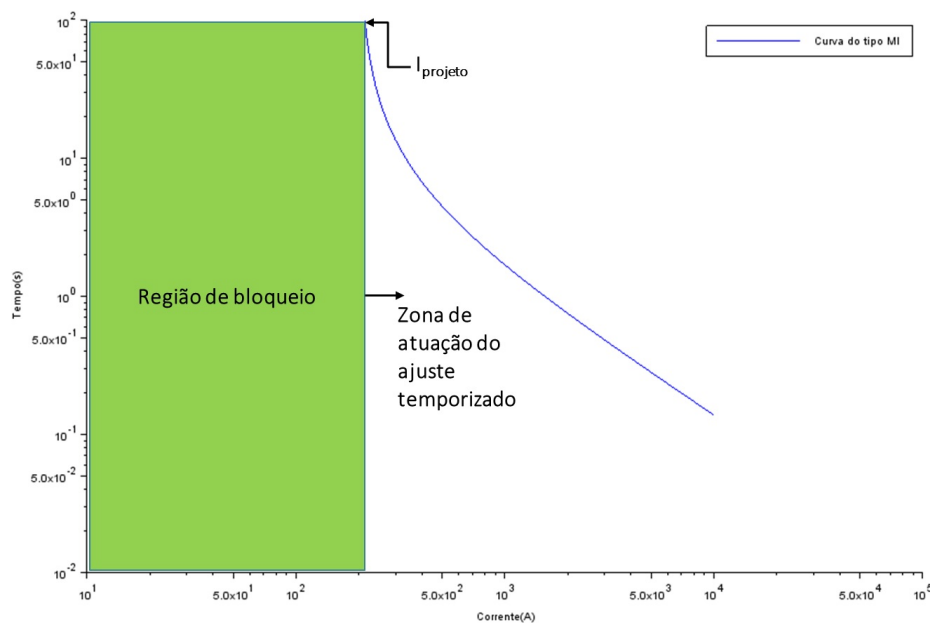
Figura 1 – Sistema de Proteção



Fonte:([SOUZA, 2019](#))

pickup) o relé irá acionar o disjuntor e este irá realizar a abertura do circuito. Caso contrário, o relé se encontrará na região de bloqueio ([SILVA, 2018](#)). Na Figura 2 é representada a filosofia de atuação do dispositivo.

Figura 2 – Coordenograma de atuação e bloqueio de um relé de sobrecorrente



Fonte:([SILVA, 2018](#))

A atuação de um relé de sobrecorrente pode se manifestar de duas formas distintas conforme a necessidade do sistema: temporizada ou instantânea. A seguir,

as duas funções de atuação e seus respectivos ajustes são detalhados.

2.1.1 Relé de Sobrecorrente Temporizado

Os relés de sobrecorrente de tempo inverso possuem seu tempo de atuação relacionado com o valor da corrente com característica inversa, isto é, o tempo de atuação é inversamente proporcional à magnitude da corrente de curto-circuito que sensibiliza o relé. Assim, quando submetido à altas correntes, o relé opera mais rápido do que para níveis de corrente inferiores (FAGUNDES, 2020).

A corrente de *pick-up* de um relé de proteção, geralmente, é a corrente de projeto deste dispositivo, considerado o valor mínimo de corrente que faz com que o relé feche seus contatos em uma condição de sobrecorrente. Essa é ajustada por meio dos tapes de derivação da bobina de corrente, ou seja, pelos TCs de corrente (CAMINHA, 1977 *apud* (SILVA, 2018)).

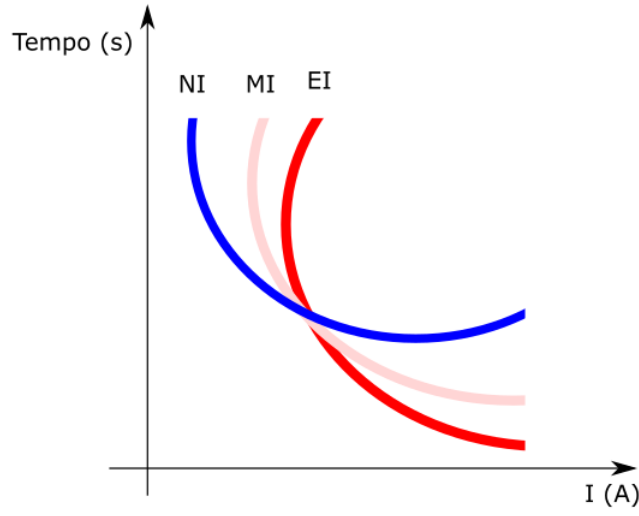
O relé de sobrecorrente de tempo inverso, também conhecido como unidade 51, requer o uso de três parâmetros, que são (KIDA, 2016 *apud* (PEREIRA, 2021)):

- ajuste do *Dial Time Setting* (DTS), parâmetro responsável por deslocar verticalmente a curva tempo versus corrente;
- corrente de ajuste do relé, comumente denominada de corrente de *pick-up* (I_p), responsável por deslocar horizontalmente a curva tempo versus corrente, de modo a ajustar a corrente mínima de atuação do relé;
- tipo de curva, a qual é determinada por equações padronizadas por normas internacionais, como IEC, IAC e IEEE.

De modo a ilustrar as curvas definidas na norma IEC, estas são mostradas na Figura 3.

Os relés de tempo inverso que utilizam a norma IEC seguem os padrões estabelecidos pelas normas IEC 255-4 e NBR 7099, onde os tipos de curvas são determinados pelo tempo de atuação do relé, cuja expressão é a seguinte:

Figura 3 – Curvas características de tempo inverso Norma IEC



Fonte: adaptado de (PEREIRA, 2021)

$$t = DTS \cdot \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{cc}}{I_p} \right)^\alpha - 1} + B \right), \quad (2.1)$$

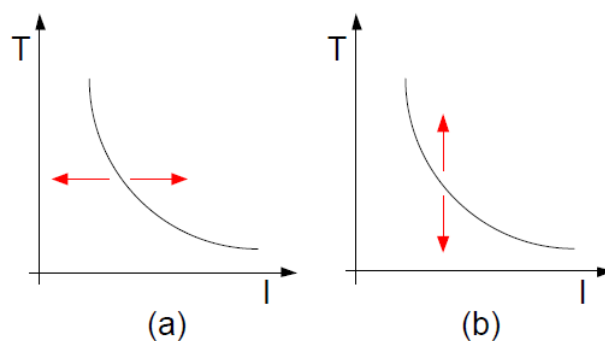
sendo, t o tempo de atuação do relé em segundos; I_{cc} a corrente de curto que ocorre no primário do TC (em regime permanente de falta); I_p a corrente de ajuste do relé (*pick-up*, em valores primários); A , B e α constantes relacionadas com o tipo da curva.

A variação dos múltiplos DTS e *pick-up* são responsáveis por mover verticalmente e horizontalmente a curva tempo versus corrente do relé, respectivamente, onde, ao ser deslocada para cima, o relé irá operar de forma mais lenta, ajustando a configuração de DTS para um valor alto. Para uma configuração de DTS de valor baixo, a operação do relé será mais rápida, isto é, em um menor intervalo de tempo, conforme Figura 4a. (FAGUNDES, 2020).

Para uma adequada coordenação, deve-se realizar o ajuste de tempo e o ajuste de corrente. Por meio do ajuste de corrente é possível deslocar horizontalmente a curva (esquerda ou direita), selecionando o valor da corrente de *pick-up*,

o que eleva ou reduz a sensibilidade do relé, conforme Figura 4b Adaptado de (BERNARDES, 2013a).

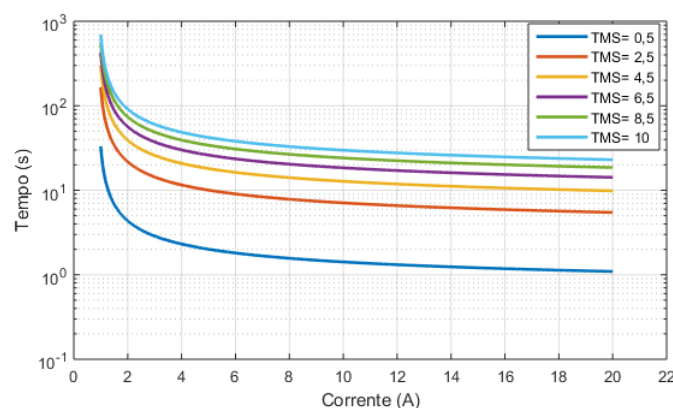
Figura 4 – Efeitos do ajuste de corrente (a) e do ajuste de tempo (b) na curva.



Fonte: (BERNARDES, 2013a)

Essa variação do DTS (também conhecido como *Time Multiplier Setting* - TMS) e, consequentemente, a alteração do comportamento da curva pode ser vista na Figura 5, na qual a sensibilização do mesmo relé com curva normalmente inversa da norma IEC é submetida a diferentes ajustes do múltiplo de tempo mantendo fixo o ajuste da corrente de atuação.

Figura 5 – Curvas NI da norma IEC de variando o ajuste do DTS e mantendo fixo o valor do I_p .



Fonte: (FAGUNDES, 2020)

Existem várias famílias de curvas de atuação de tempo inverso, sendo que serão utilizadas neste trabalho as curvas padronizadas pelo instituto ANSI (*American National Standards Institute*) e pelo IEC (*International Electrotechnical Commission*) (STDC37.112, 2018).

As curvas de atuação de tempo inverso de relés de sobrecorrente do padrão ANSI são definidas na (STDC37.112, 2018). Há cinco tipos de curva inversa: moderadamente inversa, inversa, muito inversa, extremamente inversa e inversa de tempo curto. Para cada uma destas curvas, os valores das constantes A, B e α variam. Estes valores podem ser vistos na Tabela 1, o multiplicador de tempo (DTS) desloca verticalmente a curva de atuação, sendo que, normalmente, este parâmetro varia de 0,5 a 15.

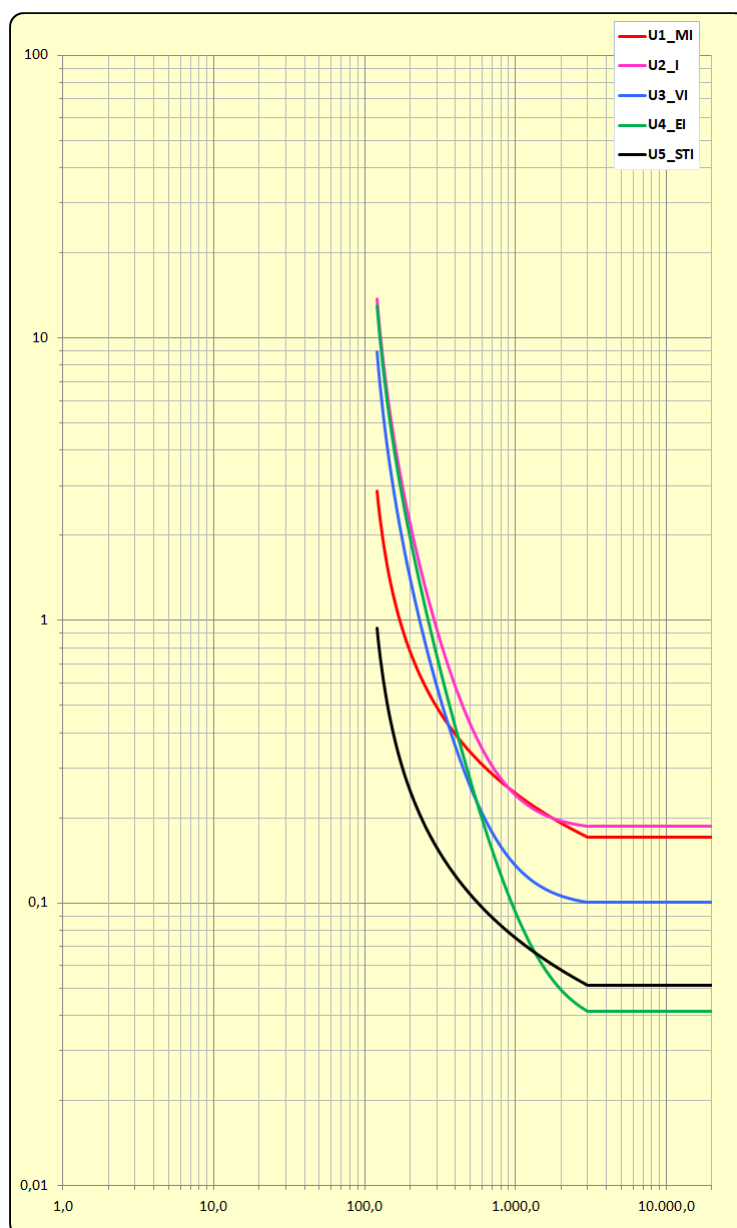
Tabela 1 – Parâmetros A, B e α para as curvas inversas padrão ANSI

Tipo de Curva	A	B	α
Moderadamente Inversa (U1)	0,0104	0,0226	0,02
Inversa (U2)	5,95	0,18	2,00
Muito Inversa (U3)	3,88	0,0963	2,00
Extremamente Inversa (U4)	5,67	0,0352	2,00
Inversa de Tempo Curto (U5)	0,00342	0,00262	0,02

Fonte: Próprio autor.

Para exemplificar, as curvas de atuação da família ANSI são mostradas na Figura 6. Utilizou-se como referência o $DTS = 1,0$; $I_p = 100$ A.

Figura 6 – Curvas inversas padrão ANSI



Fonte: Próprio autor

Para as curvas de atuação pelo padrão IEC, os valores A , B e α variam de acordo com a Tabela 2. No padrão IEC, o multiplicador de ajuste de tempo do relé (DTS) varia de 0,05 a 1 (60255-3, 1989).

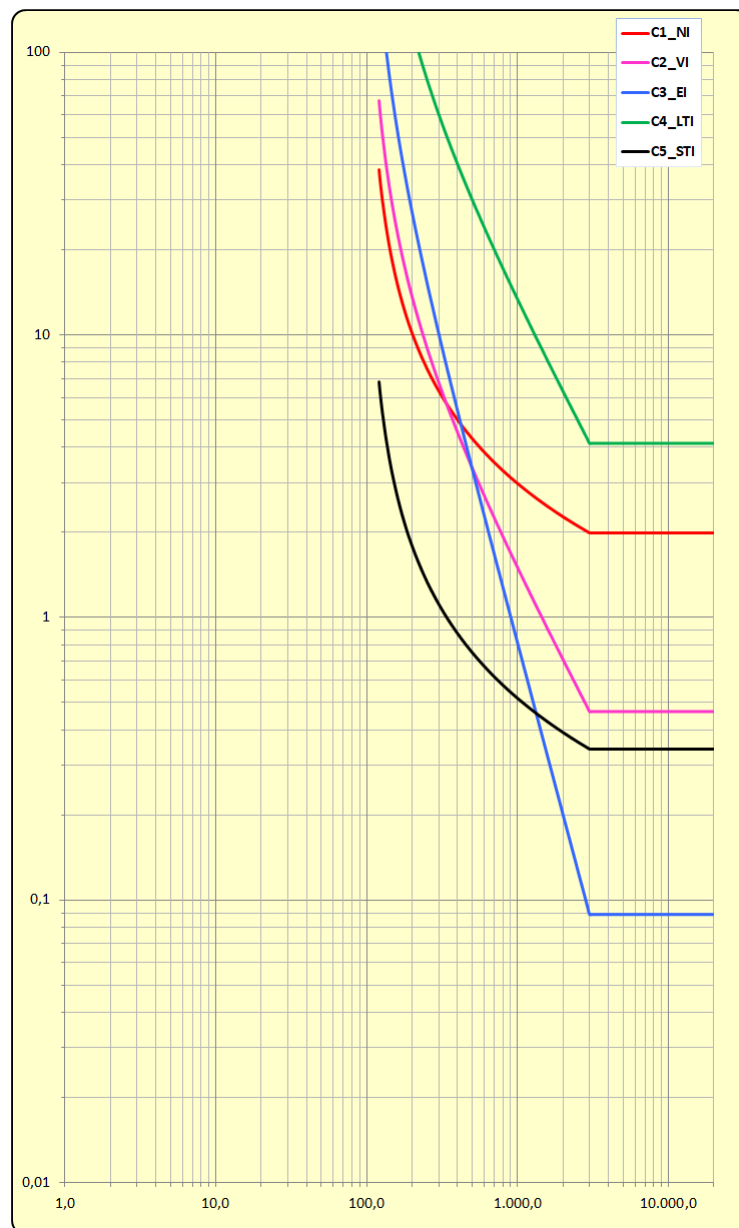
Tabela 2 – Parâmetros A, B e α para as curvas inversas padrão IEC

Tipo de Curva	A	B	α
Normal Inversa (C1)	0,14	0	0,02
Muito Inversa (C2)	13,50	0	1,00
Extremamente Inversa (C3)	80,00	0	2,00
Inversa de Tempo Longo (C4)	120,00	0	1,00
Inversa de Tempo Curto (C5)	0,05	0	0,04

Fonte: Próprio autor.

Para exemplificar, as curvas de atuação da família ANSI são mostradas na Figura 7. Utilizou-se como referência o $DTS = 1,0$; $I_p = 100$ A.

Figura 7 – Curvas inversas padrão IEC



Fonte: Próprio autor

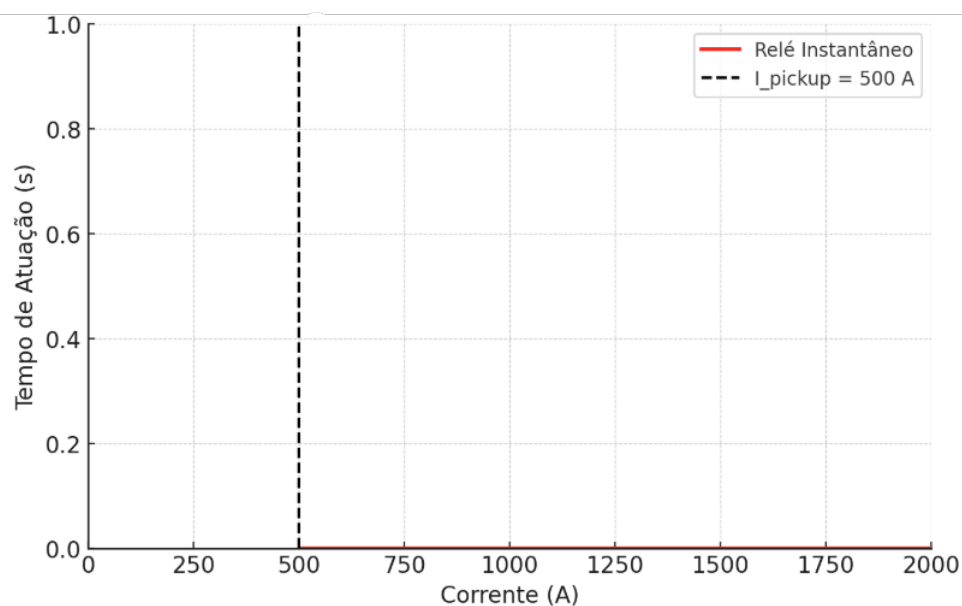
A metodologia de otimização da coordenação de relés de sobrecorrente direcionais empregada nesta pesquisa é delimitada pelas curvas determinadas pela Equação 2.1 e modelos abordados nas famílias ANSI (Tabela 1) e IEC (Tabela

2) para fins de simplificação e clareza da exposição do método abordado nesta dissertação.

2.1.2 Relé de Sobrecorrente Instantâneo

Conhecido como unidade 50, é projetado de modo que o tempo de atuação independe do valor da corrente que circula por ele, sendo comumente utilizado para proteção primária de linhas e transformadores (CORRÊA, 2012 *apud* (PEREIRA, 2021)). As unidades instantâneas de relés mais modernos, como relés de tempo definido, trabalham com dois parâmetros ajustáveis: corrente mínima de atuação e tempo de atuação (tempo definido previamente) (FAGUNDES, 2020). Em geral, nos relés de proteção das linhas de transmissão, esses ajustes possuem alcance entre 50% e 80% da extensão da LT. Um exemplo da curva característica (tempo versus corrente) para uma unidade 50 é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Curva de atuação de um relé de sobrecorrente de tempo definido.



Fonte: Próprio autor

2.2 Seletividade e Coordenação

Os subsistemas que compreendem um sistema de proteção, bem como os dispositivos que o compõem, não devem operar de maneira independente, ou seja, necessitam obedecer uma lógica de funcionamento desencadeando de maneira ordenada as operações existentes entre os mesmos, de modo a garantir o funcionamento adequado do sistema de proteção (FAGUNDES, 2020).

O sistema de proteção é considerado coordenado quando todos os equipamentos que compõem o esquema de proteção atuam de maneira rápida e seletiva para isolar o trecho sob falta. Na prática, o esquema de proteção é estruturado em níveis, baseados no princípio da proteção principal e de retaguarda. Segundo esse esquema, o dispositivo de proteção instalado mais próximo à falta será considerado como proteção principal, sendo responsável pela eliminação do defeito. Caso ocorra algum problema na atuação do relé principal, o dispositivo de retaguarda, localizado na barra à montante da proteção principal, deve atuar para eliminar a falta (Souza Júnior, 2011 *apud* (PEREIRA, 2021)). Ou seja, não basta o esquema de proteção estar coordenado, é necessário que seja seletivo, e para tal, é imprescindível que o esquema atenda aos seguintes requisitos:

- Os dispositivos de proteção principal e de retaguarda não devem atuar ao mesmo tempo.
- Os dispositivos de retaguarda devem ter um atraso predefinido, de modo a permitir a proteção principal atuar prioritariamente, na extinção do defeito.

Nos sistemas de proteção, os relés não são parametrizados de forma independente, os ajustes são realizados de forma que um relé se coordene com outro. Este procedimento é realizado para que a proteção funcione de maneira rápida, segura e eficiente. A coordenação de relés é tarefa fundamental, pois, na ocorrência do curto-circuito, são relés coordenados que vão manter o desligamento da menor porção do sistema de energia elétrica possível (SOUZA, 2019).

Dois dispositivos em série estão coordenados quando o dispositivo mais próximo a falta falhe na sua atuação e o segundo mais próximo da fonte atue. O

tempo de atuação do segundo relé em relação ao primeiro é chamado de Intervalo de Tempo de Coordenação (ITC) (SOUZA, 2019).

A utilização de um ITC fixo é comum, todavia é mais adequado calcular os valores necessários para cada ponto do sistema. Matematicamente, um ITC mínimo pode ser calculado por meio de (RUSH, 2011 *apud* (BERNARDES, 2013a)):

$$ITC = \left(\frac{2E_R + E_{CT}}{100} \right) * t + t_{disj} + t_{iner} + t_{seg}[s], \quad (2.2)$$

sendo:

E_R : erro de ajuste de tempo do relé (IEC 60255-4);

E_{TC} : erro na relação do TC (%);

t : tempo de operação do relé mais próximo(s) à falta(s);

t_{disj} : tempo de interrupção do disjuntor(s);

t_{iner} : tempo de inércia do relé(s);

t_{seg} : margem de segurança (s).

Desta forma, para que os critérios de coordenação sejam atendidos, é necessário um atraso mínimo intencional entre as sucessivas proteções da cadeia de dispositivos, de forma a maximizar a continuidade do serviço. Esse intervalo de tempo é definido como *Coordination Time Interval* (CTI). Na prática, os valores de CTI estão na faixa de 0,2 s a 0,5 s, dependendo do conservadorismo e da tecnologia dos dispositivos utilizados nos esquemas de proteção, visto que este parâmetro está ligado diretamente ao tempo de atuação do disjuntor, à tolerância do fabricante e ao tempo de segurança do projeto (PEREIRA, 2021). Matematicamente, o CTI é definido pela inequação abaixo:

$$t_r - t_p \geq CTI, \quad (2.3)$$

sendo, t_p e t_r os tempos de atuação das proteções principal e de retaguarda, respectivamente.

2.3 Relés Direcional de Sobrecorrente

Quando um sistema elétrico possui características não radiais, um simples relé de sobrecorrente pode não ser capaz de promover uma proteção adequada (PHADKE; THORP, 1990 *apud* (BOTTURA, 2014)). Ainda em (BOTTURA, 2014), esta questão pode ser mais bem compreendida considerando-se, por exemplo, duas LT paralelas que interconectam dois sistemas elétricos que contenham cada um, fontes de correntes de falta, conforme ilustrado na Figura 9. Para que os relés estejam coordenados, faz-se necessária a manutenção de um intervalo de tempo, antes que a proteção de retaguarda possa atuar, caso uma falha da proteção primária ocorra. Pelo exemplo da Figura 9, é necessário manter-se um intervalo de tempo específico entre os relés adjacentes, uma vez que tais relés não apresentam unidades direcionais. Logo, para uma falta na linha $A-B$, infere-se que:

$$t_A < t_C < t_D, \quad (2.4)$$

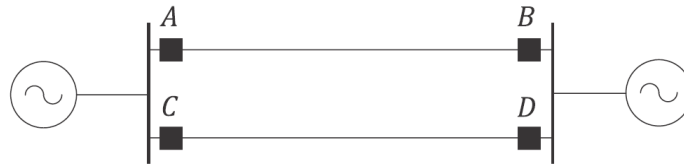
$$t_B < t_D < t_C, \quad (2.5)$$

em que t é o tempo de atuação do relé para uma dada magnitude de corrente de falta, e os índices A, B, C e D identificam a localização do relé no esquema ilustrado na Figura 9. Analogamente, se a falta está presente na linha $C-D$, tem-se para uma coordenação apropriada:

$$t_D < t_B < t_A, \quad (2.6)$$

$$t_C < t_A < t_B, \quad (2.7)$$

Figura 9 – Sistemas Transmissão em anel com duas Linhas



Fonte: (BOTTURA, 2014)

Pode-se deduzir que o conjunto de restrições construído com as Equações 2.4, 2.5, 3.1 e 2.7 são inconsistentes, uma vez que não é possível satisfazer todas as condições de faltas descritas nas Linhas $A-B$ e $C-D$, utilizando-se exclusivamente relés de sobrecorrente, pois para falta na Linha $A-B$ as Equações 2.4 e 2.5 são contraditórias, visto que, $t_C < t_D$ e $t_D < t_C$ para mesma falta. Para falta na Linha $C-D$ as Equações 3.1 e 2.7 são contraditórias, pois $t_B < t_A$ e $t_A < t_B$ para mesma falta.

Portanto, estes dispositivos não são capazes de estabelecer a proteção do sistema elétrico em questão, ou seja, os relés operam de forma descoordenada deixando o sistema vulnerável quando da ocorrência de curtos-circuitos. Conforme já comentado, a maneira de se conseguir a seletividade desejada para o relé de sobrecorrente em sistemas elétricos malhados faz-se com a adição do elemento direcional. Este fato implica na ampla utilização de Relé Direcional de Sobrecorrente (RDS) para a proteção do SEP malhados, objeto de estudo desta pesquisa, uma vez que estes relés são capazes de propiciar uma proteção eficaz em sistemas deste tipo (BOTTURA, 2014).

Os relés direcionais de sobrecorrente podem possuir as funções instantânea, tempo definido e temporizada com característica de tempo inverso. Para configurar o relé direcional de sobrecorrente com características de tempo inverso é necessário determinar o ajuste de *pick-up*, o múltiplo de tempo, tipo de curva e a direção em que a proteção deve ou não atuar (SOUZA, 2019).

Os relés direcionais, representados pelo código ANSI 67, distinguem o sentido da corrente através da análise de ângulos entre fasores. Para isso, usa-se o ângulo de fase entre a corrente de falta e alguma referência, como uma tensão. O relé, então, consegue identificar qual a defasagem entre a tensão e a corrente, estabelecendo qual é o sentido positivo da corrente de acordo com a tensão tomada como referência (PHADKE; THORP, 1990 *apud* (NEGRÃO, 2015)). O princípio da direcionalidade desse relé pode ser verificado a partir do diagrama de operação ilustrado na Figura 10.

No relé direcional a referência de tensão e os valores de corrente são obtidos a partir das duas bobinas em quadratura expostas na Figura 11. A bobina de corrente

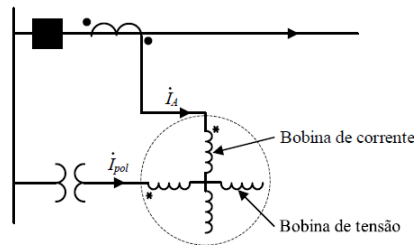
Figura 10 – Diagrama fasorial de um relé direcional



Fonte:(MORO, 2014)

é alimentada pela corrente de operação I_A e a bobina de tensão é alimentada pela tensão de polarização V_{pol} .

Figura 11 – Representação unifilar simplificada do relé direcional de sobrecorrente



Fonte:(SOUZA, 2019)

Adicionando a direcionalidade dos relés, o mesmo sistema da Figura 9 pode ser resolvido como na Figura 12.

Para uma falta na linha $A-B$, infere-se que:

$$t_A < t_D, \quad (2.8)$$

$$t_B < t_C, \quad (2.9)$$

Figura 12 – Relés direcionais aplicados a um sistema em malha



Fonte: adaptado de (NEGRÃO, 2015)

Analogamente, se a falta está presente na linha $C-D$, tem-se para uma coordenação apropriada:

$$t_D < t_A, \quad (2.10)$$

$$t_C < t_B, \quad (2.11)$$

2.4 Modelagem de Faltas

Os cálculos de correntes de curto-circuito são utilizados no cálculo dos ajustes dos relés de proteção de forma a garantir uma operação precisa e coordenada. Em sistemas de transmissão, as correntes de curto-circuito devem ser rapidamente extintas para evitar a perda de sincronismo dos geradores síncronos e grandes apagões do sistema elétrico (FILHO, 2019).

A frequência de interrupções no sistema elétrico devido a ocorrência de curtos-circuitos ocorre, aproximadamente, conforme as seguintes proporções de acordo com o tipo de falta (FILHO, 2019):

- Curto-circuito trifásico: 8%
- Curto-circuito bifásico: 14%
- Curto-circuito fase e terra: 78%

Existe um tipo de interrupção bastante característico dos sistemas de distribuição, urbano e rural, denominado defeito fugitivo. Corresponde à falta

monopolar à terra de curtíssimo tempo, como, por exemplo, a palha de uma palmeira tocando os condutores de uma rede aérea devido a uma rajada moderada de vento. As estatísticas mostram que cerca de 80% do total das interrupções são classificadas como fugitivas (MAMEDE, 2011).

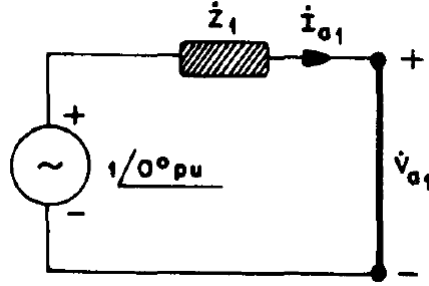
A seguir, a modelagem para cada um dos tipos de curto-circuito no SEP será descrita com o objetivo de melhor entender as dinâmicas das correntes de curto-circuito e como extrair a informação de seus valores para implementação do algoritmo de otimização de ajuste de proteção pretendido neste trabalho.

2.4.1 Modelo para Curto-Circuito 3ϕ

A partir do ponto de curto-circuito, efetua-se o equivalente de *Thévenin* de todo o sistema elétrico. Desta forma, as impedâncias de todo o sistema são sintetizadas em uma impedância equivalente vista a partir dos terminais para os quais se aplicou o equivalente de *Thévenin*, conhecida como impedância de *Thévenin*.

Como as correntes de curto-circuito 3ϕ são balanceadas, somente o modelo de sequência positiva (Figura 13) é considerado na modelagem deste tipo de curto-circuito (KINDERMANN, 1997).

Na Figura 13, $Z_1 \Rightarrow$ corresponde à impedância de sequência positiva acumulada desde o gerador, até o ponto de defeito considerado, ou seja, é a impedância de *Thévenin* de sequência positiva vista pelo ponto de defeito.

Figura 13 – Circuito equivalente no Curto-circuito 3ϕ 

Fonte: (KINDERMANN, 1997)

Ao analisar o circuito da Figura 13, tem-se que a corrente I_{a1} pode ser definida conforme Equação 2.12:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{\dot{Z}_1}, \quad (2.12)$$

Ao aplicar o teorema de *Fortescue* para obtenção das correntes de fase a partir de suas correntes de sequência, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix}$$

Assim,

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2}, \quad (2.13)$$

Sabendo que o curto trifásico é simétrico, tem-se somente a existência de componentes de sequência positiva, logo:

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a2} = 0,$$

Portanto, a partir da relação apresentada e Equações 2.12 e 2.13, tem-se que:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} = \frac{1}{\dot{Z}_1}, \quad (2.14)$$

Em módulo,

$$I_a = \frac{1}{|\dot{Z}_1|} [pu], \quad (2.15)$$

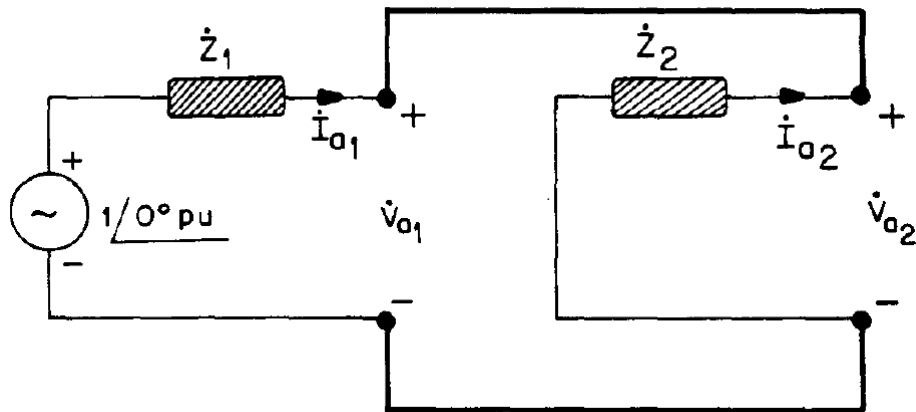
Replicando a análise apresentada para as demais fases, tem-se que a corrente em módulo de qualquer fase é:

$$I_{cc3\phi} = \frac{1}{|\dot{Z}_1|} [I_{base}], \quad (2.16)$$

2.4.2 Modelo para Curto-Circuito 2ϕ

Para o curto-circuito 2ϕ , os modelos de sequência são conectados em paralelo, conforme Figura 14.

Figura 14 – Modelos em Paralelo no Curto-circuito 2ϕ



Fonte: (KINDERMANN, 1997)

De acordo com (KINDERMANN, 1997), tem-se que a impedância $\dot{Z}_1$ é igual à impedância $\dot{Z}_2$,

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2,$$

Logo, tem-se, a partir da análise do circuito da Figura 14, que:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \frac{1}{2\dot{Z}_1}, \quad (2.17)$$

Ainda analisando o circuito da Figura 14,

$$\dot{I}_{a2} = -\dot{I}_{a1},$$

Aplicando a matriz de transformação de *Fortescue*:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}_{a1} \\ -\dot{I}_{a1} \end{bmatrix},$$

logo, como,

$$\dot{I}_a = 0,$$

$$\dot{I}_b = 1.0 + \dot{a}^2 \dot{I}_{a1} - \dot{a} \dot{I}_{a1} :: \dot{I}_b = \dot{I}_{a1}(\dot{a}^2 - \dot{a})$$

considerando,

$$\dot{a} = 1/120^\circ, \dot{a}^2 - \dot{a} = \sqrt{3}/-90^\circ,$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{a1} \sqrt{3}/-90^\circ,$$

$$\dot{I}_b = \frac{\sqrt{3}/-90^\circ}{2\dot{Z}_1},$$

obtendo-se apenas o módulo da corrente, tem-se

$$\dot{I}_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{|\dot{Z}_1|}, \quad (2.18)$$

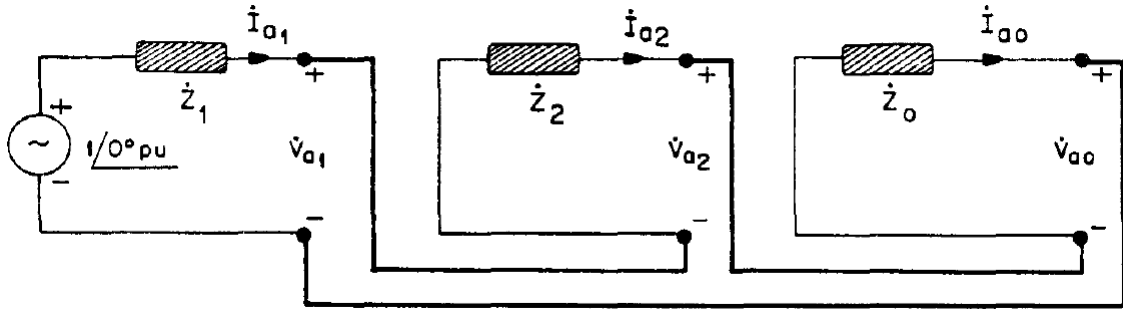
Comparando a Equação 2.18 com a expressão da Equação 2.16, chega-se à expressão da Equação 2.19:

$$\dot{I}_{cc2\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{I}_{cc3\phi}, \quad (2.19)$$

2.4.3 Modelo para Curto-Circuito 1 ϕ

Para o curto-circuito fase-terra os modelos de sequência são conectados em série, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Modelos em Série no Curto-circuito 1 ϕ -terra



Fonte: (KINDERMANN, 1997)

Onde, Z_0 é impedância de sequência zero acumulada desde o gerador até o ponto de defeito.

Ao analisar o circuito da Figura 15, tem-se que as correntes I_{a0} , I_{a1} e I_{a2} podem ser definidas conforme Equação 2.20:

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0} = \frac{1}{2\dot{Z}_1 + \dot{Z}_0}, \quad (2.20)$$

pelo Teorema de *Fortescue*, tem-se,

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2}, \\ \dot{I}_a &= 3\dot{I}_{a1} \therefore \dot{I}_a = \frac{3}{2\dot{Z}_1 + \dot{Z}_0} \end{aligned}$$

Desta forma, o módulo da corrente de curto-circuito 1ϕ -terra, é,

$$\dot{I}_{cc1\phi-terra} = \frac{3}{|2\dot{Z}_1 + \dot{Z}_0|} \dot{I}_{base}, \quad (2.21)$$

2.4.4 Cálculo Matricial de Curto-circuito

A matriz de impedância $[Z_{BARRA}]$, também conhecida como matriz de curto-circuito, contém a impedância equivalente de *Thévenin* de todas as barras em relação à barra de referência (elementos da diagonal principal da matriz) e também a impedância de transferência entre cada barra do sistema e todas as outras barras em relação à barra de referência (elementos fora da diagonal principal).

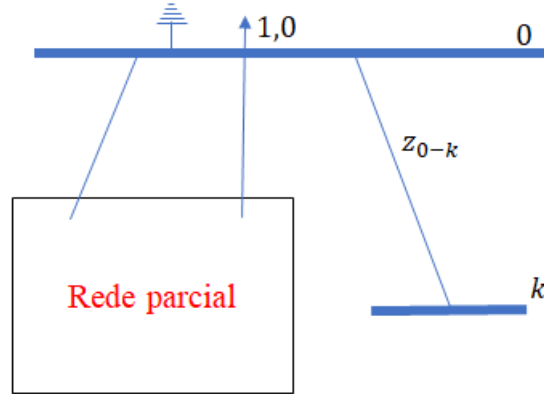
O método de formação da matriz $[Z_{BARRA}]$ mais difundido consiste em construir a matriz passo a passo, simulando a própria construção da rede a partir da barra de referência, acrescentando-se um ramo por vez. Parte-se da matriz de dimensão unitária e, a partir de modificações sequenciais, obtém-se a matriz do sistema completo. Este procedimento exige a ordenação prévia das impedâncias dos ramos, o que garante a conexidade da rede em qualquer fase da formação da matriz, evitando-se desta forma problemas de singularidade das matrizes parciais (SATO, 2015).

Assim, a formação da matriz por este método tem rotinas distintas, conforme os tipos de ramos a serem incluídos na rede:

- Caso 1 - Adicionar uma nova impedância Z_b em uma nova barra para o nó de referência.
 - A matriz inicial é aumentada em uma linha e uma coluna, com elementos fora da diagonal iguais a zero e o elemento da diagonal igual à impedância própria que for inserida.
 - Desta forma, os elementos da matriz inicial não sofrem modificações, logo, os parâmetros de tensão e corrente para as barras pertencentes ao sistema original não sofrem mudanças.

Na Figura 16 é ilustrada a inclusão da linha tipo 1 e as Equações 2.22 e 2.23 são as lógicas implementadas para a construção computacional da matriz de impedância a partir do caso ilustrado.

Figura 16 – Modificação de Z_{barra} Caso 1



Fonte: Próprio autor

$$Z_{k,k} = z_{0-k}, \quad (2.22)$$

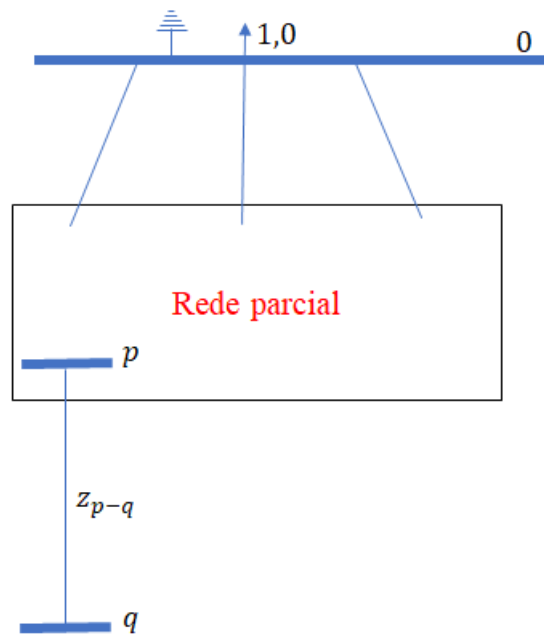
$$Z_{i,k} = Z_{k,i} = 0, \quad (2.23)$$

- Caso 2 - Adicionar uma nova impedância Z_b em uma nova barra para uma barra existente.
 - Inclui-se uma nova linha e uma nova coluna na matriz inicial, na qual os elementos fora da diagonal principal são iguais aos elementos da linha e da coluna k (barra onde o novo elemento é conectado) e o elemento da diagonal principal será igual a $Z_{kk} + Z_{novo}$.

- Desta forma, os elementos da matriz inicial não sofrem modificações, logo, os parâmetros de tensão e corrente para as barras pertencentes ao sistema original não sofrem mudanças.

Na Figura 17 é ilustrada a inclusão da linha tipo 1 e as Equações 2.24 e 2.25 são os algoritmos.

Figura 17 – Modificação de Z_{barra} Caso 2



Fonte: Próprio autor

$$Z_{q,q} = Z_{p,p} + z_{p-q}, \quad (2.24)$$

$$Z_{q,i} = Z_{p,i} = 0, \quad i \neq q, \quad (2.25)$$

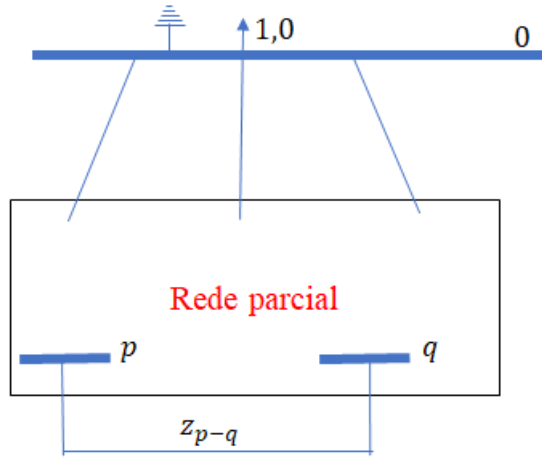
- Caso 3 - Adicionar uma nova impedância Z_b entre duas barras já existentes.

Neste passo, faz-se necessário empregar a técnica da Redução de *Kron* para composição da nova matriz, visto que este tipo de inserção impacta nos valores dos elementos da matriz original (pré-inserção).

Para tanto, faz-se necessária a aplicação das seguintes etapas:

- Adição de uma nova linha na matriz Z_{barra} a partir da Equação 2.26 e de uma nova coluna a partir da Equação 2.27;
- Cálculo do elemento $Z_{q+1,q+1}$ da matriz Z_{barra} ampliada a partir da Equação 2.28.

Figura 18 – Modificação de Z_{barra} Caso 3



Fonte: Próprio autor

$$Z_{q+1,i} = Z_{p,i} - Z_{q,i}, \quad (2.26)$$

$$Z_{i,q+1} = Z_{i,p} - Z_{i,q}, \quad (2.27)$$

$$Z_{q+1,q+1} = Z_{p,p} + Z_{q,q} + z_{p-q} - 2 * Z_{p,q}, \quad (2.28)$$

Calculada a matriz com a Equação 2.28, esta é reduzida pela aplicação da Redução de *Kron* usando a Equação 2.29. A modificação dos elementos não pertencentes à linha e à coluna do laço pode ser executada mais facilmente elemento por elemento. Desta forma, a modificação de um elemento $Z_{i,j}$, pode ser dada como:

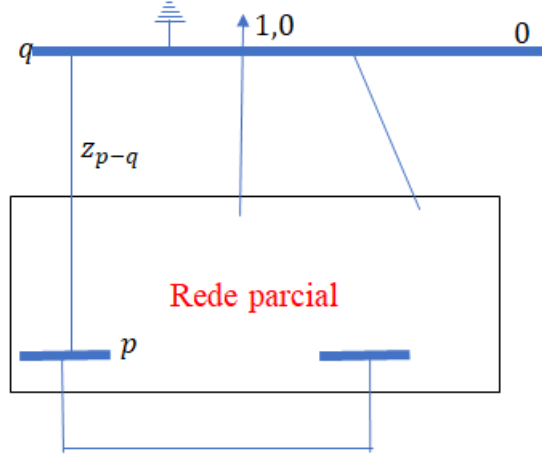
$$Z'_{i,j} = Z_{i,j} - \frac{Z_{i,q+1} * Z_{q+1,j}}{Z_{q+1,q+1}}, \quad (2.29)$$

- Caso 4 - Adicionar uma nova impedância Z_b em uma barra existente para nó (barra) de referência.

Assim como no caso 3, a redução de *Kron* também é necessária diante da modificação dos elementos da matriz original, visto que este tipo de inserção modifica impacta nos valores dos elementos da matriz original (pré-inserção).

Para tanto, faz-se necessária a aplicação das seguintes etapas:

- Inclui-se, temporariamente, uma nova linha e uma nova coluna na matriz inicial, na qual os elementos fora da diagonal principal são iguais aos elementos da linha e da coluna k (barra onde o novo elemento é conectado) e o elemento da diagonal principal será igual a $Z_{pp} + Z_{novo}$.
- Após isso, elimina-se a barra fictícia aplicando-se a redução de *Kron*.
- Adição de uma nova linha na matriz Z_{barra} a partir da Equação 2.30 e de uma nova coluna a partir da Equação 2.31;
- Cálculo do elemento $Z_{p+1,p+1}$ da matriz Z_{barra} ampliada a partir da Equação 2.32.

Figura 19 – Modificação de Z_{barra} Caso 4

Fonte: Próprio autor

$$Z_{p+1,i} = Z_{p,i}, \quad p \neq i, \quad (2.30)$$

$$Z_{i,p+1} = Z_{i,p}, \quad p \neq i, \quad (2.31)$$

$$Z_{p+1,p+1} = Z_{p,p} + Z_{p-q}, \quad (2.32)$$

Calculada a matriz com a Equação 2.32, esta é reduzida pela aplicação da Redução de *Kron* usando a Equação 2.29.

2.5 Otimização - Introdução

Os problemas de otimização estão presentes em diversas áreas de aplicação, como medicina, planejamento de transportes, roteamento de veículos, planejamento da produção, projetos de engenharia, gerenciamento de tráfego aéreo, sistemas de potência, telecomunicações e muitos outros domínios (PAIVA, 2018).

A otimização consiste em um processo que objetiva encontrar a melhor solução para determinado problema. Assim, há uma necessidade constante

da construção de algoritmos de otimização eficientes e robustos, capazes de resolver problemas nas diversas áreas supracitadas. Recentemente, os algoritmos de otimização meta-heurísticos vêm sendo amplamente empregados para resolver problemas dessa natureza. As meta-heurísticas¹ são utilizadas por serem mais poderosas que os métodos convencionais, que se baseiam nas lógicas formais ou na programação matemática, além de o tempo necessário para execução ser menor do que o dos algoritmos exatos (PAIVA, 2018).

Um conjunto de algoritmos inspirado na natureza vem sendo frequentemente aplicado com sucesso na área de otimização. A maioria desses algoritmos baseia-se em algumas características de sucesso do sistema biológico e, portanto, são chamados de algoritmos bioinspirados. Uma classe especial deles inspira-se na inteligência dos enxames e, por isso, são conhecidos como algoritmos baseados em inteligência de enxames (PAIVA, 2018).

A inteligência de enxames diz respeito ao comportamento coletivo de vários agentes que interagem entre si e que seguem algumas regras. Um agente, quando é observado de forma individual, não pode ser considerado inteligente, porém, um sistema com vários deles apresenta um comportamento auto-organizável e utiliza a inteligência coletiva.

Esses algoritmos consistem em um conjunto de meta-heurísticas que se baseia em alguns seres vivos cujos comportamentos emergentes podem resultar em uma capacidade de resolver problemas complexos. A Otimização por Enxame de Partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*), por exemplo, tem sido amplamente utilizada no contexto de problemas de otimização para implementar técnicas que buscam inspiração no comportamento social das aves e dos peixes. Os indivíduos da população são representados por partículas no espaço de busca, as quais se movimentam com o objetivo de convergir para a posição de uma partícula ótima (PAIVA, 2018).

A seguir, o PSO é descrito em maiores detalhes.

¹ São algoritmos gerais adaptáveis a diversos problemas de otimização

2.5.1 PSO

O algoritmo de otimização adotado nesta pesquisa é o PSO (*Particle Swarm Optimization*), proposto por [Kennedy e Eberhart \(1995\)](#) a partir da modelagem matemática do comportamento do bando de pássaros em revoada. Ao levantar voo, o bando comportava-se de forma aleatória, porém, em pouco tempo, os pássaros já se encontravam voando em bando de forma ordenada e, ainda, ao encontrar um local com alimento, todas as aves do bando se dirigiam para a mesma região. Baseado nisso, os autores propuseram em seu estudo um algoritmo de busca simples e robusto, no qual cada ave é considerada um ponto ou partícula, e a posição onde está localizada o alimento, ou seja, o local do pouso do bando, seria o ponto ótimo da busca.

O principal elemento que produz a evolução dos indivíduos é a velocidade do deslocamento (voo, no caso dos pássaros), representada por um vetor dentro do intervalo de busca que, a cada intervalo de tempo, muda a posição da partícula, a qual é calculada em função da posição e velocidade no instante anterior, atualizando a evolução ([FAGUNDES, 2020](#)).

Assim, o PSO pode ser descrito pelas equações 2.33 e 2.34.

$$v_i^{(k+1)} = \omega \cdot v_i^{(k)} + r_1 C_1 (Pbest_i^{(k)} - x_i^{(k)}) + r_2 C_2 (Gbest^{(k)} - x_i^{(k)}), \quad (2.33)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + v_i^{(k+1)}, \quad (2.34)$$

em que,

k é o índice da iteração atual;

ω é o coeficiente de inércia, importante para definir o espaço de busca;

C_1 e C_2 são constantes, parâmetros cognitivo e social, respectivamente;

r_1 e r_2 são valores aleatórios (com probabilidade uniforme) entre 0 e 1;

$Pbest_i$ é o melhor vetor da partícula i já encontrado;

$Gbest$ é a melhor vetor de todas as partículas analisadas, definindo a melhor solução já encontrada até a iteração corrente;

i é o índice de partícula, que varia de 1 a N , em que N é a quantidade de partículas (tamanho do bando);

$x_i^{(k)}$ é o vetor corrente da partícula i na iteração k ; e

$v_i^{(k)}$ é a velocidade da partícula i na iteração k .

Cada partícula é composta de três vetores: a sua posição no espaço de busca em D dimensões $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$; a sua melhor posição encontrada até o momento $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$; e a sua velocidade para uma trajetória $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. No início da execução do algoritmo, a posição e a velocidade de cada partícula são inicializadas aleatoriamente. Em seguida, o valor de *fitness* de cada uma delas é avaliado por uma função objetivo, a fim de definir os dois “melhores” valores. Eles são conhecidos como p_{Best} e g_{Best} . O g_{Best} influencia o movimento da partícula em direção à melhor posição encontrada pelo enxame, enquanto o p_{Best} movimenta a partícula para a melhor posição encontrada por ela mesma. Cada partícula é atraída para a localização na qual se encontra a g_{Best} . A velocidade e a posição de cada uma são atualizadas, respectivamente, por meio das Equações 2.33 e 2.34 (PAIVA, 2018).

Todos os vetores nas Equações 2.33 e 2.34 são de dimensões $n \times 1$, em que n é o número de variáveis que serão otimizadas. Os parâmetros C_1 e C_2 controlam o fluxo de informações entre o enxame e a partícula atual. Se $C_1 > C_2$, então há peso maior no comportamento coletivo, caso contrário, a partícula assume maior peso em sua busca local. As duas constantes C_1 e C_2 estão associadas à velocidade das partículas voadoras para a posição mais otimista e sua melhor localização, essas constantes controlam a dimensão de busca e o tempo gasto para obter a solução ótima por cada partícula. Em (SHI; EBERHART, 1999) definiram ambos os coeficientes de aceleração (como são chamados as constantes C_1 e C_2) como 2,0 e observaram uma melhora no desempenho do algoritmo, enquanto quando partículas alteradas voam para soluções inviáveis. Para valores maiores de coeficiente de aceleração, as partículas voam além da região de solução ótima e para valores menores, as partículas não conseguem atingir as regiões alvo devido a ficarem presas na região inviável antes de viajarem em direção à solução ótima.

Outro parâmetro bastante influente na característica de busca do algoritmo é o coeficiente de inércia (ω). Um coeficiente de inércia alto facilita uma explo-

ração global do espaço de busca, enquanto que um valor pequeno possibilita uma busca local (espécie de ajuste fino). Portanto, a apropriada seleção do coeficiente de inércia fornece um balanço entre a capacidade de busca local e global do algoritmo, exercendo assim, influência sobre o número de iterações do mesmo. Em (SHI; EBERHART, 1998), foi proposta a adição do termo ω (coeficiente de inércia) na Equação 2.33 de atualização de velocidade para aprimorar a capacidade de busca das partículas, estabilizando a busca local e a busca global. De acordo com a modificação proposta em (SHI; EBERHART, 1998), o coeficiente de inércia é incorporado na equação 2.33 da seguinte forma: um valor de peso de inércia mais alto promove a exploração, enquanto um valor mais baixo facilita a exploração, o que aumenta a capacidade de busca local do algoritmo PSO. Um estudo anterior conduzido em (SHI; EBERHART, 1998) mostrou uma melhoria substancial no desempenho do PSO quando o peso de inércia é definido entre 0,9 a 1,2. Recentemente, estudos adotaram o uso do peso de inércia linearmente decrescente, que foi implementado pela primeira vez em (EBERHART; SHI, 2000), o valor de (ω) foi mantido entre 0,9 a 0,4, o que resultou em melhor desempenho (LANGAZANE; SAHA, 2022a).

3

Revisão Bibliográfica

Para realizar esta pesquisa, fez-se um levantamento do estado da arte nos trabalhos publicados com o propósito de avaliar o uso de métodos de otimização de relés de sobrecorrente (direcionais ou não-direcionais). Nesse capítulo discuti-se de forma crítica as contribuições mais relevantes e métodos de otimização que foram empregados. Alguns desses trabalhos propõem o uso de técnicas de otimização convencionais e outros utilizaram algoritmos inteligentes para realizar a otimização. Além disso, é possível encontrar técnicas convencionais aliadas a técnicas inteligentes para resolver o problema de coordenação. Um breve resumo das técnicas empregadas é apresentado na Tabela 3.

No artigo (DEEP; BANSAL, 2009), o autor trabalha com dois modelos de sistemas elétricos, um com 03 barras (IEEE-3) e outro com 04 barras (IEEE-4). A metodologia de otimização é o *Laplace Crossover Particle Swarm Optimization* (LXPSO), a qual utiliza uma nova estratégia de compartilhamento de informações entre as partículas do enxame usando um novo *crossover*, chamado *Laplace Crossover* (LX), com base na distribuição de *Laplace*. Os resultados obtidos pelo LXPSO foram comparados com os resultados disponíveis na literatura. A técnica empregada mostrou que o LXPSO é capaz de fornecer resultados superiores em termos de otimização e

confiabilidade em comparação com outros métodos.

Na pesquisa realizada por (BOTTURA, 2014), o autor buscou apresentar um método para a coordenação dos Relés Direcionais de Sobrecorrente (RDS). O sistema elétrico analisado refere-se a uma parte do sistema de subtransmissão da rede básica brasileira. Os dados de curto-circuito foram obtidos a partir de simulações no *software CAPE*¹ (*Computer-Aided Protection Engineering*). Um método de otimização híbrido foi implementado baseado na combinação e aplicação de Programação Linear (PL) e Algoritmo Genético (AG). O algoritmo desenvolvido permitiu a realização de diversos estudos de curtos-circuitos necessários para a obtenção e avaliação da coordenação dos pares de RDS, tanto para a topologia principal do SEP em análise, como para outras configurações de operação caracterizadas, principalmente, pela alteração topológica do SEP. Os resultados demonstram que o algoritmo foi capaz de fornecer uma coordenação adequada para os RDS, respeitando todas as restrições impostas pelo problema de coordenação.

Em (NEGRÃO, 2015), o autor propõe uma nova metodologia para a solução do problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente em sistemas de transmissão em malha. São utilizadas informações sobre a atuação do relé como dispositivo de proteção principal (ou retaguarda local no caso de se considerar o relé de distância) e também de sua atuação como proteção de retaguarda remota, fornecendo uma base mais sólida para definição dos ajustes. A partir de uma série de critérios determinados de acordo com a instalação, define-se uma área de ajuste do relé, diretamente sobre sua curva de atuação. Sobre esta área, aplica-se um método de otimização capaz de encontrar o melhor ajuste possível para o dispositivo em análise. A metodologia é aplicada sem a necessidade de uma análise topológica do sistema, sendo que as informações da localização do relé e sua integração com os outros dispositivos de proteção são resumidas durante o estudo de curto-circuito, que fornece os dados de entrada para a metodologia. O algoritmo

¹ O CAPE é um software desenvolvido e comercializado pela Siemens. Ele constitui em uma ampla ferramenta para engenheiros responsáveis pela proteção de sistemas de transmissão e distribuição, e tem sido utilizado por algumas concessionárias tais como a Energisa Sergipe/Paraíba. Maiores informações sobre o software e a companhia podem ser encontradas em: <https://www.siemens.com/br/pt/produtos/servicos/energia/pss-software/pss-cape.html>.

resume os critérios de coordenação em pontos de referência, de modo que a análise é feita relé a relé, eliminando assim problemas comuns como o de tratamento de banco de dados e ganhando em agilidade e simplicidade no tratamento do problema. A resposta fornecida é bastante intuitiva, sendo fácil entender os resultados obtidos e quais seriam as implicações caso na prática sejam necessárias adequações à instalação. Neste trabalho, os parâmetros otimizados foram o *pickup* de partida do relé e o *Dial Time Setting* (DTS), além da escolha da melhor curva, onde foram estudadas curvas família IEC e ANSI.

No artigo publicado por (SHAH; NANOTY; RAJPUT, 2016), o autor elabora um estudo comparativo de diferentes abordagens de inteligência artificial (IA) e IA híbrida. Neste trabalho, os parâmetros otimizados foram o *pickup* de partida do relé e o *Dial Time Setting* (DTS), além da escolha da melhor curva, embora a aplicação concentrou em uma curva pré-definida, no caso a IEC NI (*Normal Inverse*). Foram testadas técnicas com diferentes abordagens de otimização como *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Accelerated Particle Swarm Optimization* (APSO) e *APSO-Linear Programming* (APSO-LP) são aplicados para resolver problema de coordenação para DOCRs em caso de teste de 15 barramentos. Os resultados obtidos apresentam que o método híbrido APSO-LP ofereceu a solução mais eficaz para este problema analisado.

No artigo (BANGAR; KALAGE, 2017), o autor estuda a otimização dos ajustes do relé de sobrecorrente direcional considerando este sendo *backup* do Relé de distância instalado adjacente a mesma barra e outro relé de sobrecorrente conectado em outra Linha de Transmissão ele seja proteção de retaguarda imediata. Neste trabalho, os parâmetros otimizados foram o *pickup* de partida do relé e o *Dial Time Setting* (DTS), além da escolha da melhor curva, embora a aplicação concentrou em uma curva pré-definida, no caso a IEC NI (*Normal Inverse*). O trabalho apresenta o relé de *backup* de sobrecorrente direcional e coordenação de relé de distância problema como um problema não linear de otimização restrita. Foi aplicado um algoritmo de otimização chamado de JAYA. O algoritmo JAYA sempre tenta obter a

melhor solução e tenta evitar a pior solução do problema de otimização. Ao atingir o melhor solução o algoritmo *JAYA* tenta se tornar vitorioso. Este algoritmo adaptado, busca minimizar a seguinte função $f(x)$:

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,best,i} - |X_{j,k,i}|) - r_{2,j,i}(X_{j,worst,i} - |X_{j,k,i}|), \quad (3.1)$$

em que,

$X'_{j,k,i}$ – o novo valor atualizado de $X_{j,k,i}$

$X_{j,best,i}$ – o melhor valor de $X_{j,best,i}$

$X_{j,worst,i}$ – o pior valor de $X_{j,worst,i}$

$r_{1,j,i}$ e $r_{2,j,i}$ – dois números aleatórios (0 a 1)

O valor de $X'_{j,k,i}$ é aceito se der o melhor valor da função objetivo. Este valor torna-se a entrada para o próximo iteração, e esse processo continua. O algoritmo será encerrado após a conclusão da iteração pré-definida.

Em (KORASHY et al., 2018), o autor emprega a técnica *Grey Wolf Algorithm* (GWO) para encontrar as configurações ideais para relés de sobre-corrente direcionais (DOCR), a fim de minimizar o tempo total de operação para todos os relés primários e manter a margem de coordenação do relé entre os pares de relés. Os ajustes do relé, corrente de partida (I_p) e ajuste do mostrador de tempo (DTS) são considerados como variáveis de decisão. A disponibilidade da técnica sugerida é testada usando um sistema de rede de quinze barramentos usando MATLAB. Os resultados usando o algoritmo GWO são comparados com *Electromagnetic Field Optimization* (EFO), *Cuckoo Search Algorithm* (CSA) e *Modified Electromagnetic Field Optimization* (MEFO). Os resultados usando GWO comprovam a viabilidade dos algoritmos propostos para resolver o problema de coordenação de DOCRs em comparação com outros algoritmos de otimização.

No trabalho de (SILVA, 2018), o autor modelou um algoritmo com o objetivo de determinar as correntes de curto-circuito em cada dispositivo de proteção primária, assim como calcular as correntes mínimas de atuação das unidades de sobre-corrente temporizada e os ajustes de temporização dos relés.

Utilizou-se técnicas da biologia evolutiva para otimizar a parametrização do sistema proposto. Técnicas de Algoritmos Genéticos, como cruzamento e mutação dos indivíduos foram empregadas. O estudo concentrou-se em sistemas radiais, onde foram testadas um grupo de três curvas IEC, com busca o TMS otimizado para até 04 relés empregados no sistema analisado.

Em (SOUZA, 2019), o autor desenvolveu metodologia para comparação de métodos de otimização determinísticos com abordagem semi-empírica, heurísticos e híbridos aplicados na obtenção dos valores otimizados da corrente de *pick-up* e múltiplo de tempo em relés direcionais de sobrecorrente considerando a atuação da proteção de distância. O modelo usou como dado de entrada os limites da corrente de curto-circuito trifásico no início da linha de transmissão, os pares de relés a serem coordenados, os limites operativos do múltiplo de tempo, a corrente de *pick-up* e o tipo de curva a ser utilizada. Os resultados foram obtidos em diferentes aplicações, atendendo às restrições e validando os resultados obtidos com resultados da literatura.

Em (KORASHY et al., 2020), uma técnica de otimização eficiente, chamada *Improved Moth-Flame Optimization* (IMFO) é proposta para melhorar o desempenho da *Moth-Flame Optimization* (MFO). Então, ambos MFO e IMFO são aplicados para resolver o problema de coordenação de padrão e não padrão relés de sobrecorrente direcionais (DOCRs). No IMFO proposto, a hierarquia de liderança do lobo cinzento O otimizador é usado para melhorar o desempenho do MFO convencional com o objetivo de encontrar a melhor solução. O principal objetivo para a coordenação ideal de DOCRs é minimizar o tempo total de operação para todos os relés primários, bem como satisfazer os critérios de seletividade entre pares de relés sem qualquer violação em as restrições operacionais. O desempenho e a viabilidade do IMFO proposto são investigados usando três redes diferentes (rede de 8 barramentos, rede de 9 barramentos e rede de 15 barramentos). O IMFO proposto é comparado com MFO convencional e outras técnicas de otimização bem conhecidas. Os resultados mostram a eficácia do o IMFO proposto na resolução de problemas de coordenação de DOCRs padrão e não padrão sem qualquer violação entre os relés primário e de *backup*. Além disso, os resultados mostram o poder do

IMFO proposto em encontrando as melhores configurações de relé ideais e minimizando o tempo total de operação dos relés cuja redução atinge mais de 28% em relação ao MFO convencional. Além disso, a redução do total do tempo de operação dos relés primários atinge mais de 50% com o uso da curva de relé não padrão.

Em (FAGUNDES, 2020), o autor avaliou a aplicabilidade de meta-heurísticas bio-inspiradas para resolução do problema de coordenação dos relés de sobrecorrente e comparou com outras metodologias existentes. A proposta contempla a formulação matemática do problema de coordenação dos relés em quatro diferentes situações de teste, sendo dois sistemas radiais e dois sistemas malhados. Os relés de sobrecorrente utilizados seguem a Norma IEC de curva de tempo normal, e a solução da coordenação é obtida por meio da utilização das técnicas de otimização matemática conhecidas por meta-heurísticas, inspiradas no comportamento de elementos da natureza, sendo elas: Algoritmo dos Vaga-lumes, Otimização por Enxame de Partículas e Algoritmo de Busca dos Cucos. Neste trabalho, os parâmetros otimizados foram o *pickup* de partida do relé e o *Dial Time Setting* (DTS). Os resultados encontrados com os métodos testados foram satisfatórios e mostram a possibilidade de alcançar soluções de qualidade igual ou superior quando comparados aos estudos de outras metodologias disponíveis na literatura específica. Dentre as três metodologias implementadas, os ajustes obtidos via Algoritmo dos Cucos reportaram as soluções de melhor qualidade para a parametrização dos relés de proteção dos casos simulados.

No artigo publicado por (ALAE; AMRAEE, 2021), no *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, o autor estuda a configuração ideal dos relés de sobrecorrente direcionais (DOCRs) para detecção e eliminação de falhas no menor tempo de operação possível em uma rede malhada e com a presença de geração distribuída. O principal objetivo foi encontrar os valores ótimos do *Dial Time Setting* (DTS) e o *Pickup Multiple Setting* de acordo com as restrições impostas. Devido à complexidade do problema do tipo *Mixed Integer Non-linear Programming* (MINLP), foi aplicado o *Imperialistic Competition Algorithm* (ICA) para resolver o problema de coordenação de

DOCRs. Foram testados três casos e os resultados são comparados com o algoritmo padrão ramos de limites e outros algoritmos meta-heurísticos de otimização, o que demonstrou a eficácia do algoritmo proposto.

Em (PEREIRA, 2021), a autora propõe dois algoritmos para resolver o problema de coordenação de relés de sobrecorrente no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), em particular, fornecer ajustes dos parâmetros dos relés, atendendo as restrições de coordenação e seletividade. O primeiro algoritmo baseou-se no uso exclusivo da meta-heurística Algoritmo de Evolução Diferencial (AED), enquanto o segundo constituiu um algoritmo híbrido, o qual baseou-se no uso combinado de ADE e Programação Linear. O problema foi formulado visando determinar os ajustes dos relés de forma a minimizar seus tempos de atuação, sem comprometer a seletividade, confiabilidade e a sensibilidade. Destaca-se que os parâmetros otimizados foram o *pickup* de partida do relé e o *Dial Time Setting* (DTS). A avaliação do desempenho dos algoritmos foi realizada considerando três sistemas-testes (um radial e dois malhados), de portes e complexidade diferentes. Os algoritmos foram comparados entre si e com outros métodos propostos na literatura especializada. Ao final, constatou-se a eficácia dos algoritmos estudados, os quais apresentaram soluções satisfatórias para solucionar o problema, com o algoritmo híbrido apresentando o melhor desempenho.

Em (FAGUNDES ARIAN RODRIGUES, 2025), os autores propõem o uso do *Cuckoo Search Algorithm* modificado por meio da aplicação de *Levy Flights* (LF) para resolver esse problema de coordenação. O método proposto foi testado para três diferentes sistemas teste, mostrando que ele alcança soluções com qualidades iguais ou superiores às relatadas na literatura especializada, utilizando sua formulação não-linear, onde tanto o multiplicador de tempo quanto as configurações de tap devem ser parametrizados. Destaca-se que os parâmetros otimizados foram o *pickup* de partida do relé e o *Dial Time Setting* (DTS). A avaliação do desempenho dos algoritmos foi realizada considerando dois sistemas-testes (ambos malhados com 3 e 9 barras), de portes e complexidade diferentes. Os algoritmos foram comparados entre si e com outros métodos propostos na literatura especializada. Ao final,

constatou-se a eficácia dos algoritmos estudados, os quais apresentaram soluções satisfatórias para solucionar o problema, com o algoritmo híbrido apresentando o melhor desempenho.

3.1 Resumo da Revisão Bibliográfica

A partir da análise da pesquisa bibliográfica, pode-se verificar que o cálculo dos ajustes dos relés é simples e requer baixo esforço computacional. Porém, a quantidade de relés delimita a robustez que o problema de otimização exige.

Além disso, os parâmetros DTS e a corrente I_p , apresentam uma maior influência no tempo de atuação dos relés, visto que são responsáveis por deslocar vertical e horizontalmente a curva tempo versus corrente. Algumas pesquisas optaram por buscar otimizar essas duas variáveis, embora, a aplicação prática do *pick-up* de corrente de ajuste seja aplicado nas Distribuidoras/Transmissoras de energia com determinado fator de sobrecarga em função da capacidade dos condutores nas linhas transmissão. Isso torna o emprego da otimização no *pick-up* menos necessária do ponto de vista de aplicação prática, ao tempo que, o DTS passa a ser a variável que, uma vez otimizada, trará uma resposta de tempo eficiente ao sistema modelado de acordo com os dados de entrada. Dessa forma, este trabalho se concentrou em oferecer três de linhas de contribuição:

- A aplicação desenvolvida permite encontrar os melhores DTS para todas as curvas que utilizam as normas IEC 255-4 e NBR 7099, especialmente as curvas das tabelas 1 e 2, as quais são largamente utilizadas na maioria dos relés de proteção de sobrecorrente existentes no mercado.
- A aplicação permite testar de forma automática todos os cenários de faltas em barramentos de subestações e também faltas do tipo *close-in*, porém, trazendo um relatório completo da operação do sistema ponto a ponto, calculando a abertura de cada um dos terminais envolvidos na falta simulada, de modo a verificar a eficiência do algoritmo até a completa eliminação da falta, dado que as aberturas de terminais

(antes da eliminação total da falta) provocam mudanças substanciais nas contribuições de correntes de curto-circuito no sistema.

- O sistema desenvolvido também dispõe de algoritmo de autonumeração dos relés e ordenação das barras, exigindo mínimo de esforço possível do usuário no tratamento dos dados de entrada.

Tabela 3 – Síntese da revisão bibliográfica.

Referência	Sistema	Extinção da Falta	Parâmetros			Algoritmo	Contribuições
			Curvas	DTS	I_p		
(KORASHY et al., 2018)	Anel	Não	IEC SI	✓	✓	<i>Grey Wolf Optimization</i> (GWO)	Mostrou que o GWO se aplica a problemas de coordenação. Não apresentou cálculos de Icc. DOCRs
(KORASHY et al., 2020)	Anel	Não	IEC SI, VI, EI, LTI	✓	✓	<i>Improved Moth-Flame Optimization</i> (IMFO)	IMFO apresentou redução de 28% dos tempos em relação ao MFO. Não apresentou cálculos de Icc.
(BANGAR; KALAGE, 2017)	Anel	Não	IEC SI	✓	✓	<i>JAYA</i> (Vítoria)	Técnica utilizada para otimizar ajustes de Sobrecorrente em relação ao de distância no mesmo relé. Não otimizou coordenação de relés <i>back-up</i> x principal.
(DEEP; BANSAL, 2009)	Anel	Não	IEC SI	✓	✓	<i>Laplace Crossover Particle Swarm Optimization</i> (LXPSO)	Mostrou superioridade do LXPSO sobre a técnica LX. Não apresentou cálculos de Icc.
(ALAEI; AMRAEE, 2021)	Anel	Não	IEC SI, VI, EI	✓	✓	<i>Imperialistic Competition Algorithm</i> (ICA)	Mostrou bons resultados da técnica ICA para para redes malhas e com GD. Não apresentou cálculos de Icc.
(SHAH; NANOTY; RAJPUT, 2016)	Anel	Não	IEC SI	✓	✓	<i>Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Accelerated Particle Swarm Optimization, APSO- Linear Programming</i> (GA), (PSO), (APSO), (APSO-LP)	Apresentou comparativo de técnicas de otimização para o caso de 15 barras. Não apresentou cálculos de Icc.
(LANGAZANE; SAHA, 2022b)	Radial	Não	IEC SI	✓	✓	<i>Genetic Algorithms, Particle Swarm Optimization</i> (GA), (PSO)	Mostrou melhores resultados do PSO são obtidos com melhores coeficientes de inércia e tamanho do enxame. Não apresentou cálculos de Icc.
(KHURSHID et al., 2019)	Anel	Não	IEC SI	✓	✓	<i>Whale Algorithm Optimization, Hybrid Whale Algorithm Optimization</i> (WAO), (HWAO)	Aplicou uma solução híbrida do WAO que apresentou melhores resultados que o próprio WAO. Utilizou apenas uma curva de proteção.
(PEREIRA, 2021)	Radial/Anel	Não	IEC SI	✓	✓	ADE Clássico; Híbrido ADE+PL	Mostrou comparativo entre ADE e ADE Híbrido. Utilizou apenas uma curva de proteção.
(FAGUNDES ARIAN RODRIGUES, 2025)	Anel	Não	IEC SI	✓	✓	<i>Cuckoo Search Algorithm</i> modificado por <i>Levy Flights</i> (LF)	Aplicou uma solução modificada que apresentou melhores resultados que CSA. Utilizou apenas uma curva de proteção.
(CAMPOS, 2025)	Anel	Sim	IEC, IEEE	✓	×	<i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	Cálculo automático: Correntes de curto-circuito, numeração dos relés; verificação da restrições; verificação da eliminação total das faltas e otimização via PSO das curvas de proteção da família IEC e IEEE

Fonte: Elaborado pelo autor.

4

Formulação do problema e algoritmo proposto

O objetivo deste Capítulo é abordar as técnicas adotadas para resolver o problema de coordenação dos relés de sobrecorrente direcionais, descrevendo de forma detalhada os algoritmos empregados em cada etapa necessária para determinar os valores mínimos de DTS que atendem às restrições do sistema.

Durante a etapa de revisão bibliográfica, pode-se perceber a grande preocupação em encontrar uma coordenação eficiente entre dispositivos de proteção. É possível encontrar diversas propostas de soluções para o problema de coordenação de relés direcionais de sobrecorrente temporizados, contemplando ou não a presença de relés de sobrecorrente instantâneos e/ou o relé de distância.

A presente pesquisa teve seu desenvolvimento delimitado pela busca da otimização dos relés de sobrecorrente direcionais temporizados e, de forma a complementar, foram determinados também os ajustes dos relés de sobrecorrente direcionais instantâneos.

A metodologia adotada para a realização deste trabalho foi totalmente desenvolvida com o auxílio do *software* Scilab *Scientific Laboratory* e seus cálculos validados a partir do *software* CAPE *Computer-Aided Protection Engineering* (Figura 20), ambos instalados em um *notebook* com as seguintes especificações:

- Processador Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @ 1.80 GHz
- RAM instalada 16,0 GB
- Sistema operacional de 64 bits, processador baseado em x64
- Edição *Windows 11 Enterprise*

Como delimitação, o algoritmo foi desenvolvido na busca da otimização das faltas trifásicas (3ϕ), que serão a base das análises dos ajustes otimizados, embora a metodologia desenvolvida possa ser facilmente adaptada para estudos de caso de curto-circuito fase-terra, simétricos e assimétricos. O curto-circuito trifásico, é, normalmente, de maior intensidade e norteia os estudos de proteção realizados nas concessionárias de energia. Dessa forma, para o tratamento matricial para cálculo das faltas 3ϕ , utiliza-se os dados de impedância de sequência positiva (Z_1) do equivalente de *Thévenin* conectado a barra *swing* do sistema, bem como a impedância de sequência positiva (Z_1) das Linhas de Transmissão (LTs) conectadas ao sistema analisado.

Figura 20 – *Software* utilizados na elaboração/validação do algoritmo.

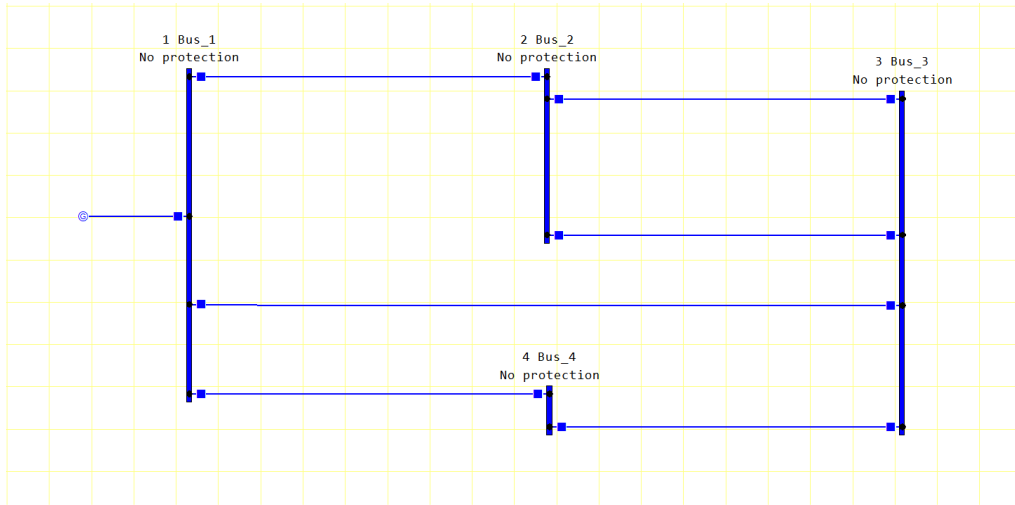


Fonte: Próprio autor.

O sistema modelo, apresentado na Figura 21, utilizado no desenvolvimento do algoritmo de otimização possui 04 (quatro) barras de operação (em que uma barra é a *swing* do sistema) e 06 (seis) LTs, das quais, duas estão em paralelo, pois é importante que o algoritmo tenha a capacidade de determinar as contribuições de faltas em todos casos.

A metodologia, resumida no fluxograma apresentado na Figura 22, é detalhada nas seções seguintes, levando em consideração as seguintes etapas:

Figura 21 – Rede modelo usada no desenvolvimento do algoritmo



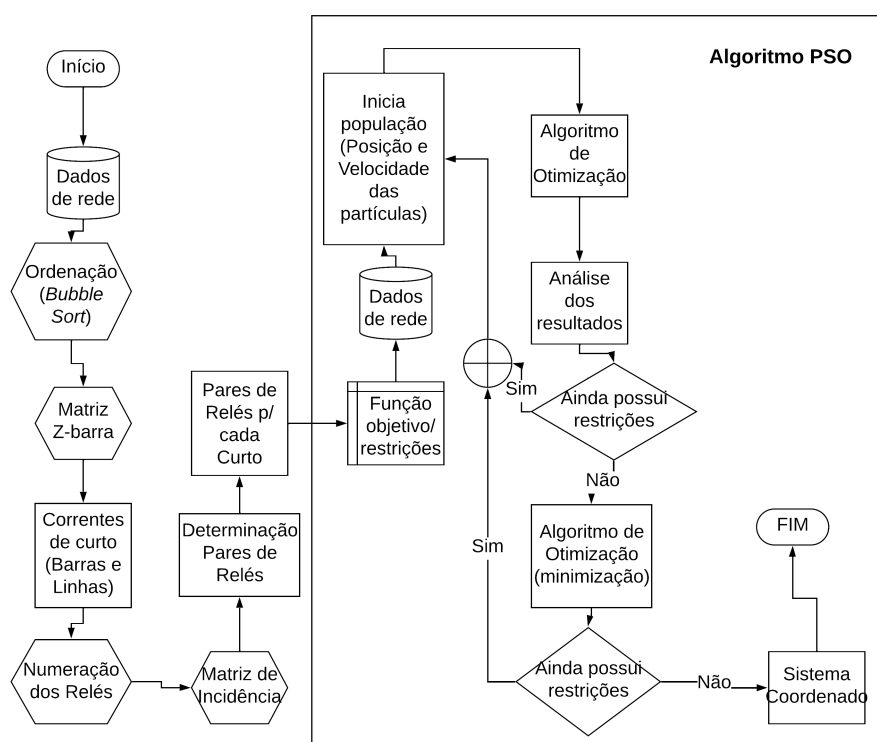
Fonte: Próprio autor.

- Construção da matriz de rede, em que, inicialmente é realizado um ordenamento crescente das barras do tipo **PARA**, ou barra remota, utilizando o algoritmo *Bubble Sort* (MIN, 2010).
- Construção da matriz de impedância, a qual será base para cálculo das correntes de falta nas barras, bem como as contribuições de corrente em todas as LTs do sistema analisado.
- Determinação das correntes de curto-circuito (módulo e ângulo) em todas as barras do sistema, bem como as faltas do tipo *close-in*¹ em todos os terminais das LTs.
- Construção da Matriz de Incidência, técnica a partir da qual é possível determinar o conjunto dos pares de relés, conforme visto em (Braga e Saraiva (1996) *apud* (BOTTURA, 2014)). Ocorre que uma matriz, denominada de matriz de incidência (M_I), é obtida, e, posteriormente interpretada, de maneira a sistematizar a atribuição dos pares de RDS em sistemas malhados. Esta matriz possui dimensão $n \times m$, sendo n o número

¹ O curto-circuito *close-in*, que ocorre em um ponto muito próximo do relé estudado, é a situação que apresenta a maior corrente de falta (BERNARDES, 2013a).

- de barras conectadas às LTs no Sistema Elétrico de Potência (SEP) que possuem RDS e m o número de relés envolvidos na coordenação.
- Uma vez determinado todos os pares de relés, o algoritmo efetua uma varredura na matriz de rede, identificando os pares de relés que devem ser otimizados em casos de curto-circuitos nas barras do sistema.
 - Ainda há de se determinar, por meio de nova varredura na matriz de rede, todos os pares de relés que devem ser otimizados em casos de curto-circuitos do tipo *close-in* nos terminais da LTs.
 - Todos os pares de relés envolvidos nos curtos nas barras e nos curtos *close-in* nos terminais das LTs farão parte do conjunto de restrições a serem atendidas quando da busca da minimização do função objetivo.

Figura 22 – Fluxograma do algoritmo de otimização



Fonte: Próprio autor.

4.1 Tratamento dos dados de rede

A base de dados do sistema modelo avaliado contém as características das linhas de transmissão nas bases ($V_{base} : 69 \text{ kV} | S_{base} : 100 \text{ MVA}$), conforme apresentadas na Tabela 4:

Tabela 4 – Tabela de dados da rede modelo.

Barra DE	Barra PARA	$Z_{1(pu)}$	$I_{cabo}(\text{A})$
0	1	$0.00416 + j0.06036$	0
1	2	$0.10 + j0.10$	400
2	3	$0.20 + j0.50$	400
2	3	$0.20 + j0.40$	400
1	3	$0.08 + j0.20$	400
3	4	$0.30 + j0.60$	400
1	4	$0.20 + j0.30$	400

Fonte: Próprio autor.

Uma etapa fundamental é a construção da matriz Z_{barra} a partir dos dados obtidos da Tabela 4, pois é utilizada para os cálculos de curto-circuitos 3ϕ . Para tanto, são tratados todos os casos para montagem da matriz Z_{barra} , conforme detalhado em 2.4.4.

Após obter a matriz Z_{barra} do sistema, destacam-se os elementos da diagonal principal da matriz, para efetuar os cálculos de curto-circuito 3ϕ , em uma determinada barra k :

$$I_k^{(f)} = \frac{V_k^{(0)}}{Z_{kk}}, \quad (4.1)$$

Ainda com o emprego da matriz Z_{barra} , efetuam-se os cálculos das correntes circulantes nas linhas durante a falta, conforme a Equação 4.2, em que Z_{pq} é a impedância própria do ramo pq , isto é, a impedância entre as barras p e q no sistema.

$$\hat{i}_{pq} = \left(\frac{Z_{qk} - Z_{pk}}{Z_{kk}} \right) \left(\frac{1, 0}{Z_{pq}} \right), \quad (4.2)$$

Após os cálculos das correntes de curto-circuito nas barras e suas contribuições através das LT_s , faz-se necessário determinar o número de cada relé existente nas LT_s . Esse procedimento é realizado de forma automática no algoritmo a partir de uma varredura na matriz de relés e atribuindo automaticamente uma numeração à rede em estudo, conforme pode ser visto na Figura 23 e melhor compreendido no Algoritmo 1.

Algorithm 1: Algoritmo de Numeração dos Relés

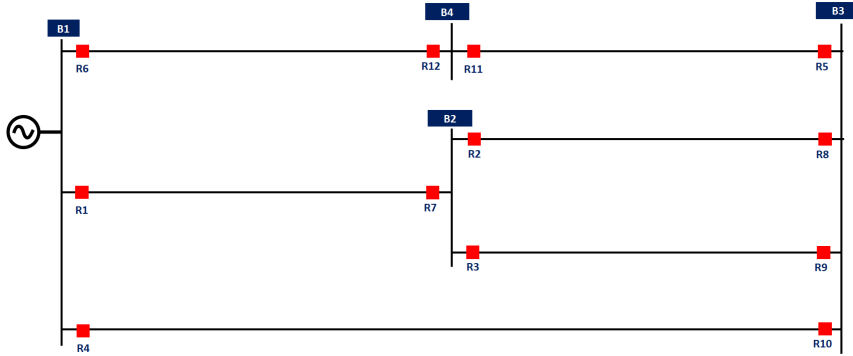
Data: Lista com n Linhas de Transmissão

Result: Lista com $2n$ relés numerados

```

1 for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
2   [Matriz Relés](i,1)=Barra DE;
3   [Matriz Relés](i,2)=Nº circuito;
4   [Matriz Relés](i,3)=Barra PARA;
5   [Matriz Relés](i,4)= $i$ ; (nº do relé adjacente a barra DE)
6   [Matriz Relés](i,5)= $i+n$ ; (nº do relé adjacente a barra PARA)
7 end
8
```

Figura 23 – Sistema elétrico malhado de 4 barras/6 Linhas/12 relés



Fonte: Próprio autor.

Na etapa seguinte, é construída a matriz de incidência M_I , em que, cada linha de M_I identifica uma barra b do sistema que possui uma determinada quantidade de barra(s) adjacente(s) b_{adj} interconectadas diretamente por

uma ou mais LTs. Os relés associados à barra b , assim como às barras b_{adj} são identificados e recebem valor $+1$ se estão com suas unidades direcionais ajustadas no sentido de b para b_{adj} , e -1 se o sentido é de b_{adj} para b . Como as colunas da matriz M_I representam cada relé do sistema, aqueles que não foram identificados para a barra b , e nem para as respectivas barras adjacentes b_{adj} , recebem valor nulo. Dessa maneira, todos os elementos da matriz são determinados, estendendo para todas as m barras do SEP o procedimento descrito acima para a barra b .

Algorithm 2: Montagem da Matriz de Incidência

Data: Lista com n Linhas de Transmissão
Result: Lista da Matriz de Incidência

```

1 for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
2   | [MIncid]([MRelés](i,1),[MRelés](i,4))=1;//relé barra adjacente
3   | [MIncid]([MRelés](i,3),[MRelés](i,4))=-1;//relé barra oposta
4 end

```

Aplicando-se o algoritmo 2 no procedimento descrito anteriormente para a rede modelo, obtém-se a seguinte matriz $[M_I]_{4 \times 12}$:

$$M_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Definida a matriz de incidência, executa-se uma rotina que determina todos os pares de relés que existem no sistema analisado, conforme pode ser verificado na Tabela 5, a qual está de acordo com a numeração dos relés apresentada na Figura 23:

Tabela 5 – Lista de pares de relés da rede modelo (Total 20 pares)

<i>Back-up</i>	1	9	1	8	2	3	4	8	9	3
Principal	2	2	3	3	5	5	5	7	7	8
<i>Back-up</i>	4	11	2	4	11	2	3	11	6	5
Principal	8	8	9	9	9	10	10	10	11	12

Fonte: Próprio autor.

4.2 Visão geral do algoritmo

4.2.1 Funções *Fitness*, Objetivo e Penalidades

A coordenação ideal dos relés de sobrecorrente direcionais visa calcular as configurações ótimas do relé para garantir que a proteção primária correspondente elimine falhas na zona protegida no menor tempo possível, desde que sejam atendidas todas as condições de restrições impostas para garantir a coordenação entre todos os pares de relés. Esse tempo é expresso pela resposta de uma determinada função objetivo, para a qual se busca a minimização.

O modelo de Função Objetivo (FO) amplamente adotado na literatura é a soma total do tempo individual de operação dos relés de proteção primária, conforme a Equação 4.3:

$$z = \min \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m T_{i,z}^k, \quad (4.3)$$

em que,

m indica o número total de relés que protegem determinado trecho ou equipamento,

n é o número total de faltas consideradas dentro da zona de proteção primária,

$T_{i,z}^k$ é o tempo de operação do relé primário R_i para uma falta na zona de proteção z ,

k é o índice dado à falta considerada.

O tempo de atuação individual de um relé para determinada falta, é calculado a partir da função *fitness* descrita na Equação 4.4:

$$t = DTS.\eta, \quad (4.4)$$

em que,

DTS indica o *Dial Time Setting* do relé R_i ;

η é obtido pela Equação 4.5:

$$\eta = \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{cc}}{I_p} \right)^\alpha - 1} + B \right), \quad (4.5)$$

em que, A , B e α são constantes particulares ao tipo de curva escolhida para o relé considerado, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. Além disso, a resposta da Equação 4.5 depende da relação $\frac{I_{cc}}{I_p}$, a qual relaciona o valor da corrente de falta vista pelo relé R_i e o seu ajuste da corrente de *pick-up* I_p .

Portanto, a FO pode ser reescrita conforme exposto na Equação 4.6:

$$z = \min \sum_{i=1}^m DTS_i \cdot \min(\eta_i), \quad (4.6)$$

em que,

m indica o número total de relés que protegem determinado trecho ou equipamento; $\min(\eta_i)$ é o menor fator η encontrado para o relé R_i , sendo calculado para o maior curto-circuito passante pelo relé R_i .

Definida a função objetivo, é preciso estabelecer as restrições que envolvem o problema de coordenação. A FO apresentada está sujeita a dois tipos de restrições, sendo elas: o critério de coordenação e seletividade e os limites nos intervalos de ajustes.

Neste trabalho, são simuladas as faltas nas barras e LTs (do tipo *close-in*). Dessa forma, são considerados, no universo de restrições, todos os pares de relés que estão envolvidos no evento analisado. Torna-se imperioso que todas as restrições de coordenação sejam atendidas para a atuação correta dos relés. Caso contrário, a seletividade do sistema pode ser perdida, resultando no acionamento desnecessário dos dispositivos de retaguarda.

A minimização da FO só deverá ser realizada se não houver mais restrições a serem atendidas. Enquanto as restrições das FO não forem todas atendidas, a FO sofrerá uma degradação, representada por uma penalização a

FO atribuída pelo algoritmo. Essa penalização deve ser proporcional à transgressão das restrições verificadas. A soma destas penalizações é incorporada ao valor da função objetivo. Quando não houver mais restrições violadas, a função objetivo não será penalizada.

Com base no exposto, o problema de minimização deste trabalho assume a seguinte forma:

$$\min f(x), \text{ sujeito a } g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (4.7)$$

em que,

x é o vetor de partículas da variável a ser otimizada, neste caso, o múltiplo de tempo dos relés;

$f(x)$ é a função objetivo a ser minimizada. Neste caso, o somatório do tempo de atuação de todos os RDS em suas respectivas zonas de proteção;

$g(x)$ é a restrição de desigualdade do problema.

Aplicando o método de penalidades ao problema de minimização proposto, define-se uma nova função objetivo, $h(x)$, dada por:

$$h(x) = f(x) + P(x), \quad (4.8)$$

em que $P(x)$ é uma função de penalidade das restrições.

A função penalidade será positiva quando alguma restrição é violada e nula quando todas as restrições são satisfeitas. Uma restrição $g_j(x)$ é atendida quando for negativa ou igual a zero. Neste trabalho, a função penalidade para as restrições de desigualdade é dada pela Equação 4.9.

$$P(x) = \sum_{j=1}^n \text{abs}(\min[0, t_r - (t_p + CTI)]), \quad (4.9)$$

em que:

n é a quantidade de restrições de desigualdade do modelo matemático;

j representa o índice da restrição;

CTI é o intervalo de tempo mínimo exigido para coordenação entre t_r e t_p ;

t_p e t_r definidos na Equação 2.3

4.2.2 Variáveis de Controle

Neste trabalho, foram adotadas algumas premissas para o controle do algoritmo, em que as variáveis de controle foram combinadas, de modo a produzir cenários de simulações. As variáveis de controle são: Velocidade das partículas, Quantidade de iterações e quantidade de partículas do enxame. Os valores e/ou intervalos ajustados em cada uma variáveis de controle são melhor detalhados nas Equações 4.10, 4.12 e 4.13.

- **Velocidade das partículas:**

O algoritmo de otimização do PSO utiliza em sua estrutura um vetor chamado velocidade das partículas (Equação 2.33), que possui duas parcelas que dependem das variáveis r_1 e r_2 , que são valores aleatórios (com probabilidade uniforme) entre 0 e 1. Assim, de modo a não permitir que o vetor velocidade $v_i^{(k+1)}$ assuma valores que desloquem o vetor posição das partículas $x_i^{(k+1)}$ para uma posição muito desfavorável a cada iteração, o controle dos valores de velocidade é realizado conforme Equação 4.11:

$$V_{max} = v \times 0.5 \times (x_{max} - x_{min}); v \in [1, 4], v \in \mathbb{N}, \quad (4.10)$$

e,

$$v_i^{(k+1)} = \min (\max (V_{min}, v_i^{(k+1)}), V_{max}); \quad (4.11)$$

em que,

$v_i^{(k+1)}$ é a velocidade da partícula i na iteração $k + 1$, e $V_{min} = -V_{max}$

- **Quantidade de iterações realizadas:**

O processo de otimização depende essencialmente das iterações necessárias em busca da convergência da FO do algoritmo. Entretanto, a

quantidade de iterações suficientes para busca da solução não é pré-determinada, sendo necessário testar cenários com quantidade limite de iterações distintas. Assim, na Equação 4.12 são apresentados os limites empregados no algoritmo:

$$N_{iter} = n \times 50; n \in [1, 5], \text{ e } n \in \mathbb{N}, \quad (4.12)$$

- **Quantidade de partículas do enxame:**

O sucesso na busca pela convergência do código PSO depende também da população de partículas do enxame utilizada no processo de iteração. Sua população necessária para eventual convergência não é um processo determinístico, sendo que são necessários testes com populações diferentes, de modo que vários cenários são testados em busca da convergência da FO, conforme Equação 4.13.

$$P = p \times 10; p \in [1, 5], \text{ e } n \in \mathbb{N}, \quad (4.13)$$

4.2.3 Variáveis de aplicação

A seguir, detalha-se premissas para o controle do algoritmo, em que as variáveis de aplicação são utilizadas de modo a garantir que algoritmo obtenha dados suficientes na busca da melhor convergência e, assim, obter os melhores resultados.

- **Vetor posição do enxame de partículas:**

O algoritmo de otimização do PSO utiliza em sua estrutura um vetor chamado posição das partículas (Equação 2.34), que depende do vetor velocidade $v_i^{(k+1)}$. Assim, de modo a não permitir que o vetor posição $x_i^{(k+1)}$ assuma valores que o desloquem para uma posição muito desfavorável a cada iteração, o controle dos valores das posições é realizado conforme Equação 4.14:

$$x_i^{(k+1)} = \min (\max (x_{min}, x_i^{(k+1)}), x_{max}); \quad (4.14)$$

em que,

x_{max} é o maior DTS permitido para ajuste na curva de proteção do relé,

x_{min} é o menor DTS permitido para ajuste na curva de proteção do relé,

$x_i^{(k+1)}$ é o vetor posição da partícula i na iteração $k + 1$.

- **Tempo Máximo de eliminação de falta:**

Em casos práticos, não é desejável que o tempo de atuação para a extinção de curtos-circuitos seja elevado, visto que isso pode comprometer a integridade do sistema. Desta forma, uma das restrições adotadas para melhorar o desempenho do sistema se trata do tempo máximo de eliminação de falta de um relé para um curto-circuito em uma barra oposta à barra adjacente ao relé em análise.

Assim, seja, $I_{cc_{bop}}$, o valor do curto-circuito para uma falta em uma barra oposta, $limtime_{bop}$, o limite de tempo de máximo de eliminação de falta de um relé para curtos na barra oposta:

$$DTS \leq \frac{limtime_{bop}}{\eta_a}, \quad (4.15)$$

em que, $limtime_{bop}$ será iniciado no menor valor adotado (0,50 s) e caso o algoritmo não encontre uma solução ótima com essa condição, será testado o próximo passo (0,75 s) e assim por diante até alcançar o valor máximo (2,0 s), caso não tenha encontrado uma solução ótima. Logo, $limtime_{bop}$ deve atender a Equação 4.16:

$$limtime_{bop} = m \times 0.25; m \in [2, 8], \text{ e } m \in \mathbb{N}, \quad (4.16)$$

em que, o fator η_a é calculado da seguinte forma:

$$\eta_a = \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{cc_{bop}}}{I_p} \right)^\alpha - 1} + B \right), \quad (4.17)$$

- **Corrente de ajuste do *pick-up* do relé fase temporizado:**

Este valor leva em conta a ampacidade do cabo da LT, que é um dados de entrada (Tabela 4) para utilização do algoritmo. Neste trabalho, adotou-se o fator de 100% como critério para definição do *pick-up* do relé de fase.

- **Corrente de ajuste do *pick-up* do relé fase instantâneo:**

Este valor leva em conta os curtos máximo ($I_{cc_{max}}$) visto pelo relé (*close-in*) e a corrente vista pelo relé para um curto-circuito na barra oposta ao relé ($I_{cc_{min}}$). A função ANSI 50 será ajustada para um alcance de 70% da LT que está na zona de proteção do relé. Como os TCs de proteção possuem uma tolerância de precisão de $\pm 10\%$, o cálculo do *pick-up* da função ANSI 50 obedecerá a Equação 4.18 e o algoritmo 3:

$$50P = (I_{cc_{max}} - I_{cc_{min}}) * 70\%, \quad (4.18)$$

Algorithm 3: Definição do ajuste 50P do relé

Input: Uma variável 50P

```

1 if 50P <  $I_{cc_{max}} \cdot 0.9$  and 50P >  $I_{cc_{min}} \cdot 1.1$  and 50P > 3 · 51P then
2   | 50P ← 50P;
3 end
4 else
5   | 50P ← OFF;
6 end
```

- **Coefficientes de Aceleração C_1 e C_2**

Os dois coeficientes C_1 e C_2 são os constantes de aceleração e ambos foram definidos como 2, conforme condições verificadas em (SHI; EBERHART, 1999) e detalhado em 2.5.1.

- **Coefficiente de Inércia (ω)**

De modo a manter o coeficiente de inércia (ω) da Equação 2.33 com um comportamento linearmente decrescente entre 0,9 e 0,4, foi adotada a Equação 4.19 para o cálculo do coeficiente de inércia, conforme detalhado em 2.5.1.

$$\omega = \frac{0,5}{1 - n_{iter}} * i + 0.9 - \frac{0,5}{1 - n_{iter}}, \quad (4.19)$$

em que,

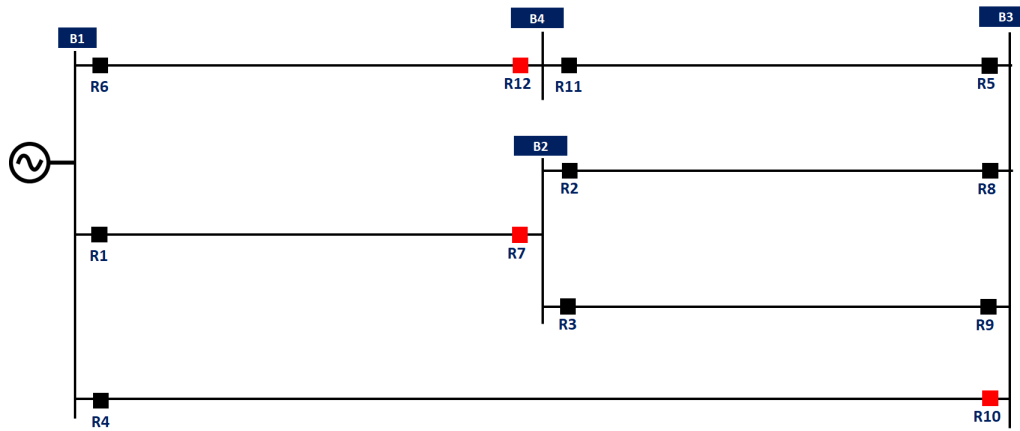
n_{iter} é a quantidade máxima de iterações do caso simulado,

i é o número da iteração atual.

- **Relés não otimizados no vetor posição do enxame de partículas:**

Em um sistema malhado com fonte única existirão relés que não terão o papel de ser uma proteção de retaguarda de nenhum outro relé para quaisquer faltas que ocorram no sistema em que estão inseridos. Esses relés com a direcionalidade voltada para faltas dentro da linha de transmissão terão como barra oposta a própria barra *Swing* do sistema. Sendo assim, esses relés podem e devem ter a atuação da proteção da forma mais rápida que possa ser ajustada. Daí é necessário que o DTS deste dispositivo esteja ajustado no menor valor aceito pelo relé (x_{min}). A forma automática de identificar quais relés preenchem essa situação é com a utilização da Matriz de Incidência (4), em que basta identificar na referida matriz quais são as colunas possuem elementos com valor -1 na Linha 01. Pode-se observar que os relés não otimizados são exatamente os que não estão presentes como *back-up* na Tabela dos pares de relés 5. Na Figura 24 os relés 07, 10 e 12 da rede modelo são as unidades não otimizadas pelo algoritmo. Para estes relés os DTS escolhidos serão 0.05 quando estiverem otimizando curvas da família IEC e 0.50 quando estiverem otimizando curvas da família IEEE.

Figura 24 – Destaque dos relés não otimizados na rede modelo



Fonte: Próprio autor.

- **Teste de curvas dos relés de sobrecorrente**

A aplicação desenvolvida busca as soluções otimizadas em 10 curvas de proteção (05 da família IEC e 05 da família ANSI). Assim, o algoritmo emprega os valores das constantes A, B e α das Tabelas 2 e 1 no processo de otimização e compila os melhores resultados encontrados em um único arquivo. O Algoritmo 4 ilustra esse processo de otimização em cada curva:

Algorithm 4: Algoritmo para testar as curvas a serem otimizadas

- 1 **Entrada:** ID i que identifica a curva
 - 2 **Saída:** Relatório de otimização das curvas de 1 a 10
 - 3 **for** $i \leftarrow 1$ **to** 10 **do**
 - 4 **end**
 - 5 Resultado otimização curva i
-

De forma geral, os procedimentos descritos nesta seção podem ser resumidos a partir do pseudocódigo apresentado no algoritmo 5:

Algorithm 5: Algoritmo geral do otimizador**Data:** Rotina de Cálculo do Algoritmo de Otimização**Result:** Lista com $2n$ relés numerados

```

1 for  $i \leftarrow 1$  to 10 do
    // Itera testando no algoritmo as 10 curvas de atuação
    do relés
2    for  $j \leftarrow 2$  to 8 do
3         $j = j \times 0.25$ 
        // Itera testando o tempo máximo de eliminação de
        falta na barra e interrompe a execução da
        instrução for quando encontrar solução ótima
4        for  $k \leftarrow 1$  to 5 do
5             $k = k \times 10$ 
            // Itera testando populações diferentes para o
            enxame de partículas
6            for  $p \leftarrow 1$  to 5 do
7                 $p = p \times 50$ 
                // Itera testando limites de iterações
                diferentes para cada população do enxame de
                partículas
8                for  $r \leftarrow 1$  to 4 do
                    // Itera testando limites diferentes para a
                    velocidade de cada população do enxame de
                    partículas
9                    exec("algoritmogeral.sci");
10                end
11            end
12        end
13        if Encontrou S.O. then
14            break; // Verifica se encontrou solução ótima para
                    o tempo limite máximo analisado
15        end
16    end
17 end

```

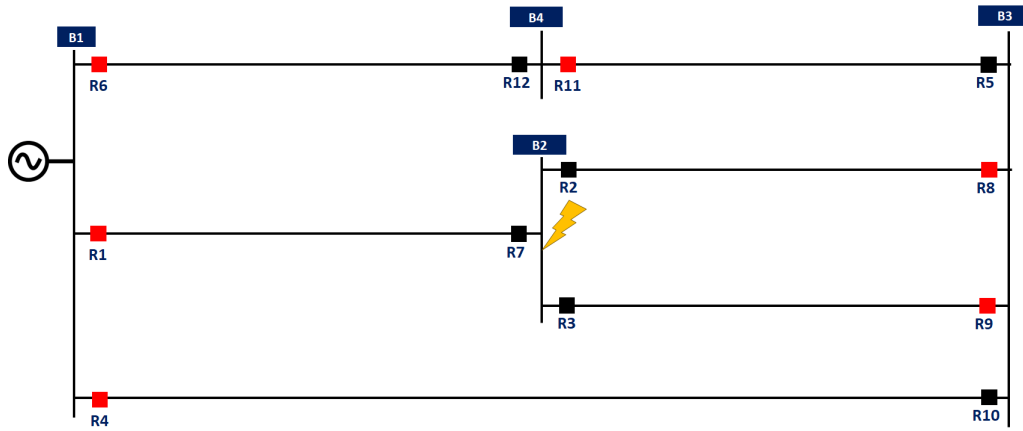
4.3 Locais de Faltas simuladas

4.3.1 Curto-circuito nas Barras

O algoritmo desenvolvido verifica as faltas nas Barras das Subestações do sistema e para cada curto-circuito simulado são definidos os relés que devem atuar para a referida falta. Nas Figuras 25 a 27, são ilustrados os casos de curto-circuito avaliados neste trabalho, e que terão seus resultados expostos no capítulo seguinte, de forma a ilustrar o potencial do algoritmo de otimização proposto.

O primeiro caso se refere a um curto-circuito na barra 02, o qual deve sensibilizar os relés R01, R04, R06, R08, R09 e R11 conforme destacado em vermelho Figura 25. Para esta condição, os pares de relés cuja coordenação é analisada são: $R_{b11} \times R_{p08}$, $R_{b11} \times R_{p09}$, $R_{b04} \times R_{p08}$ e $R_{b04} \times R_{p09}$, em que o subscrito b representa o relé de *backup* e o subscrito p representa o relé principal.

Figura 25 – Curto-circuito 3 ϕ na Barra 02.

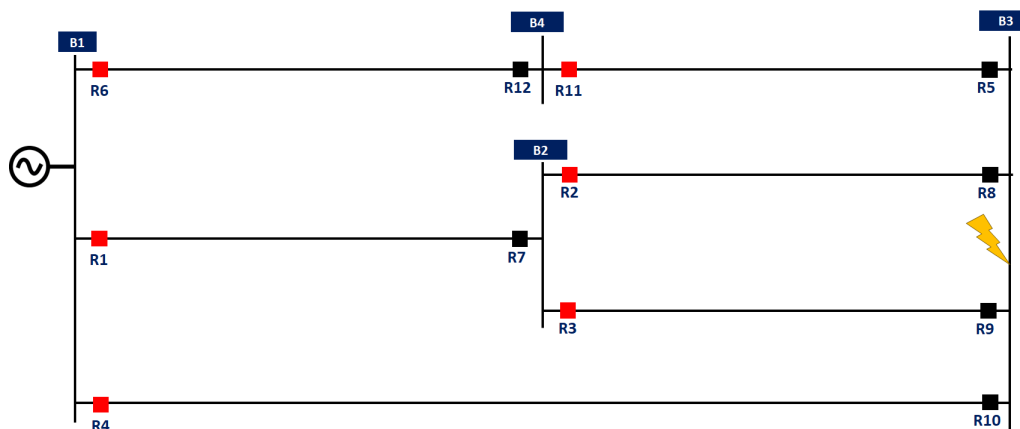


Fonte: Próprio autor.

O segundo caso representa um curto-circuito na barra 03, o qual deve sensibilizar os relés R01, R02, R04, R06 e R11 conforme destacado em

vermelho na Figura 26. Para esta condição, os pares de relés cuja coordenação é realizada são: $R_b01 \times R_p02$, $R_b01 \times R_p03$ e $R_b06 \times R_p11$.

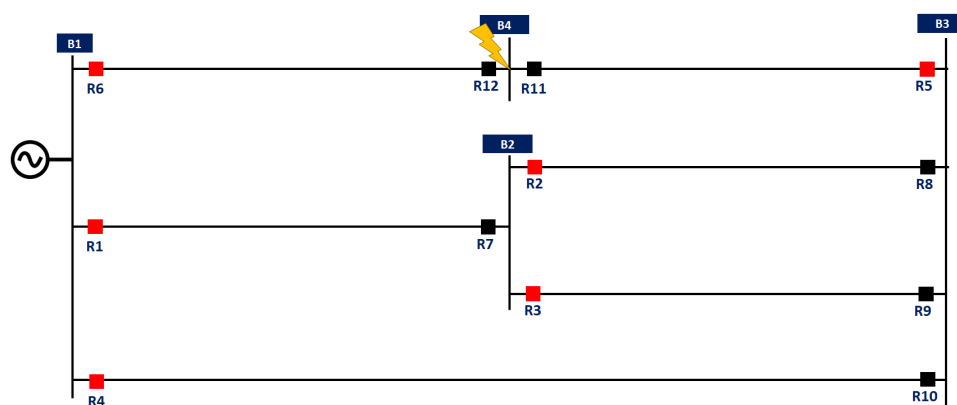
Figura 26 – Curto-circuito 3 ϕ na Barra 03.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, o terceiro caso é dado por um curto-circuito na barra 04, o qual deve sensibilizar os relés R01, R02, R03, R04, R05 e R06, conforme destacado em vermelho na Figura 27. Para esta condição, os pares de relés cuja coordenação é analisada são: $R_b02 \times R_p05$, $R_b02 \times R_p05$ e $R_b04 \times R_p05$.

Figura 27 – Curto-circuito 3 ϕ na Barra 04.



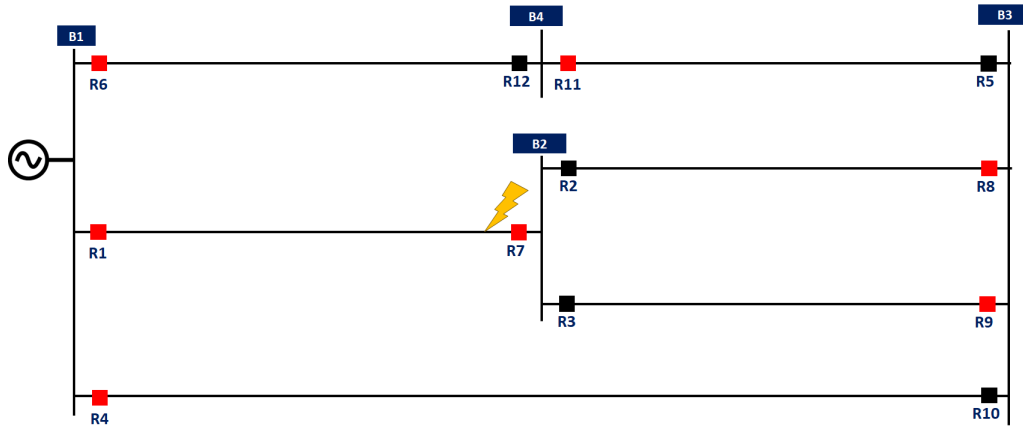
Fonte: Próprio autor.

4.3.2 Curto-circuito *Close-in* nas Linhas

O algoritmo desenvolvido também verifica as faltas do *close-in* em todas as LTs do sistema modelo e, para cada curto-circuito do tipo *close-in*, são definidos os relés que devem atuar para a referida falta. Nas Figuras 28 a 33, são ilustrados os casos de curto-circuito avaliados neste trabalho, e que terão seus resultados expostos no capítulo seguinte, de forma a ilustrar o potencial do algoritmo de otimização proposto. Vale ressaltar que, para que as análises apresentadas no capítulo a seguir não se tornem exaustivas e repetitivas, optou-se por não expor todos os casos possíveis de curtos-circuitos do tipo *close-in* para o sistema avaliado, embora a otimização tenha sido realizada para todo o sistema.

O primeiro caso se refere a um curto-circuito *close-in* no terminal Disjuntor 07, o qual deve sensibilizar os relés R01, R04, R06, R07, R08, R09 e R11 conforme destacado em vermelho na Figura 28. Para esta condição os pares de relés cuja coordenação é analisada são: $R_{b08} \times R_{p07}$ e $R_{b09} \times R_{p07}$.

Figura 28 – Curto-circuito 3ϕ *close-in* no terminal Disjuntor 07.

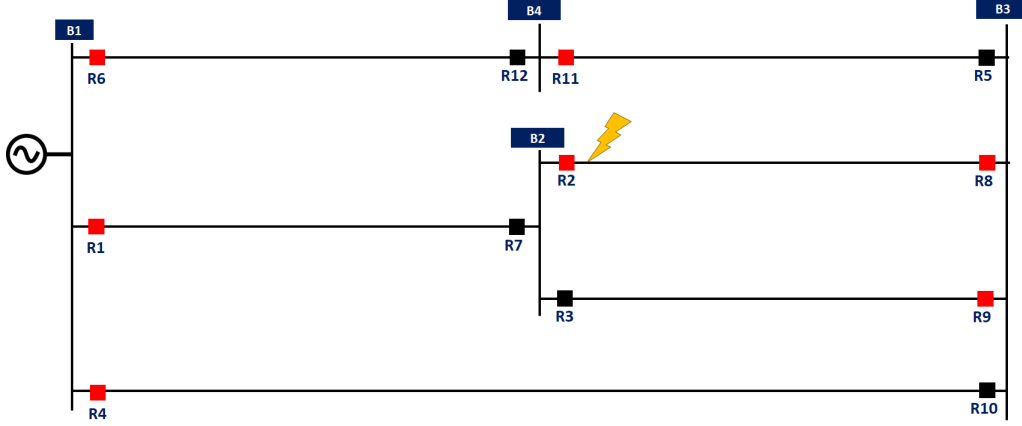


Fonte: Próprio autor.

O segundo caso se refere a um curto-circuito *close-in* no terminal Disjuntor 02, o qual deve sensibilizar os relés R01, R02, R04, R06, R08, R09 e R11 conforme destacado em vermelho na Figura 29. Para esta condição os

pares de relés cuja coordenação é analisada são: $R_{b01} \times R_{p02}$, $R_{b11} \times R_{p08}$, $R_{b11} \times R_{p09}$, $R_{b04} \times R_{p08}$ e $R_{b04} \times R_{p09}$.

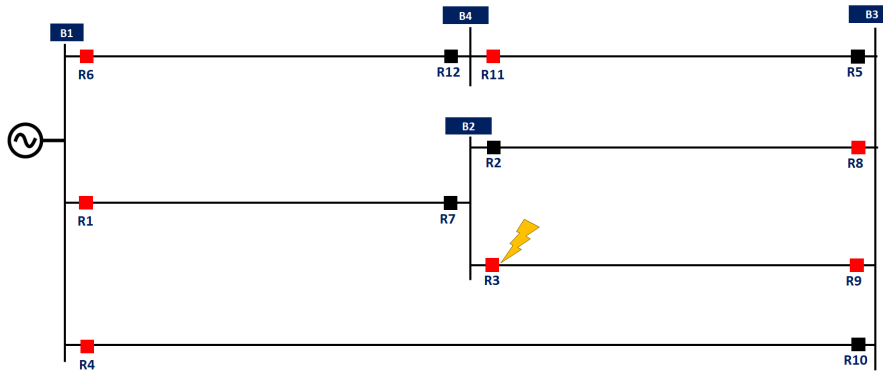
Figura 29 – Curto-circuito 3 ϕ *close-in* no terminal Disjuntor 02.



Fonte: Próprio autor.

O terceiro caso se refere a um curto-circuito *close-in* no terminal Disjuntor 03, o qual deve sensibilizar os relés R01, R03, R04, R06, R08, R09 e R11 conforme destacado em vermelho na Figura 30. Para esta condição os pares de relés cuja coordenação é analisada são: $R_{b01} \times R_{p03}$, $R_{b11} \times R_{p08}$, $R_{b11} \times R_{p09}$, $R_{b04} \times R_{p08}$ e $R_{b04} \times R_{p09}$.

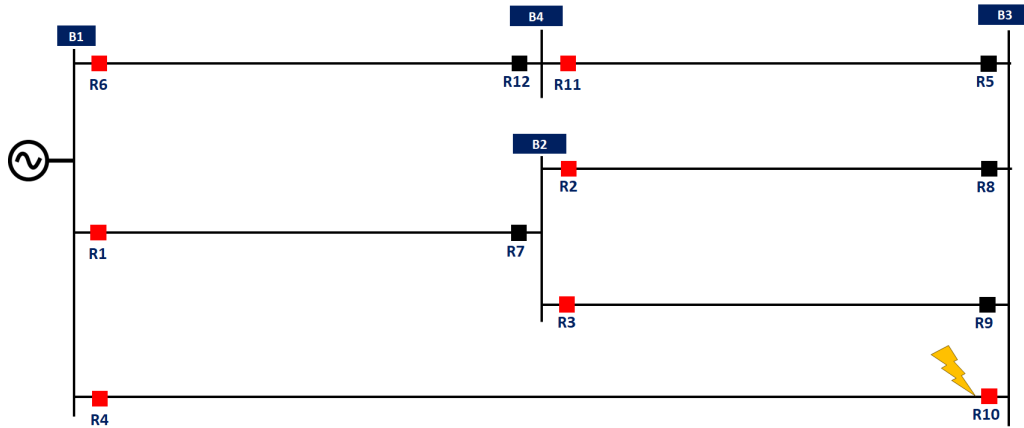
Figura 30 – Curto-circuito 3 ϕ *close-in* no terminal Disjuntor 03.



Fonte: Próprio autor.

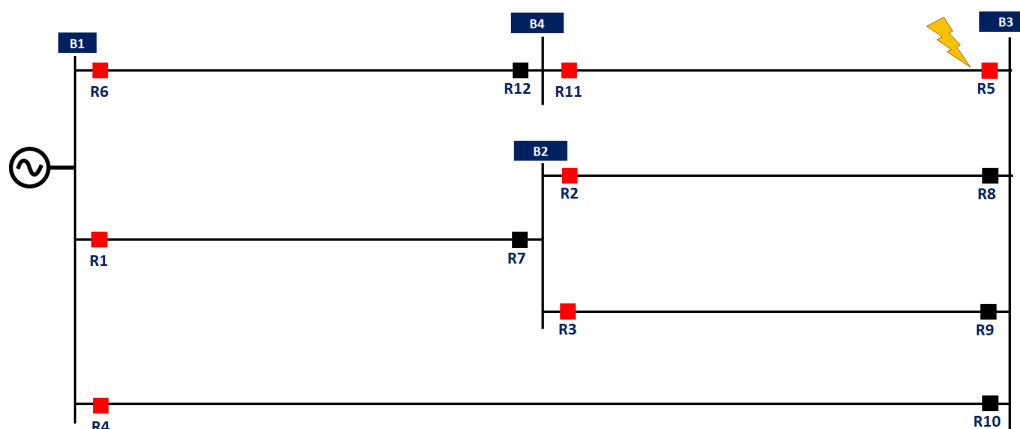
O quarto caso se refere a um curto-circuito *close-in* no terminal Disjuntor 10, o qual deve sensibilizar os relés R01, R02, R03, R04, R06, R10 e R11 conforme destacado em vermelho na Figura 31. Para esta condição os pares de relés cuja coordenação é analisada são: $R_{b02} \times R_{p10}$, $R_{b03} \times R_{p10}$ e $R_{b11} \times R_{p10}$.

Figura 31 – Curto-circuito 3 ϕ *close-in* no terminal Disjuntor 10.



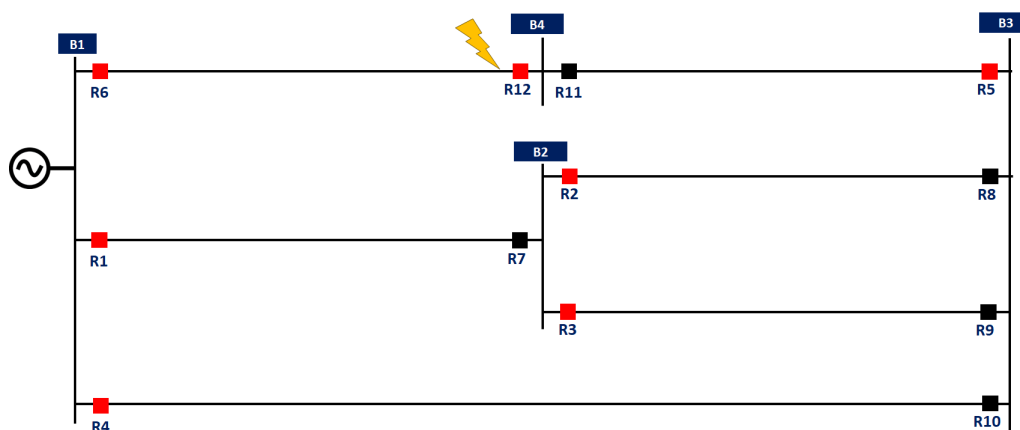
Fonte: Próprio autor.

O quinto caso se refere a um curto-circuito *close-in* no terminal Disjuntor 05, o qual deve sensibilizar os relés R01, R02, R03, R04, R05, R06 e R11 conforme destacado em vermelho na Figura 32. Para esta condição os pares de relés cuja coordenação é analisada são: $R_{b02} \times R_{p05}$, $R_{b03} \times R_{p05}$, $R_{b04} \times R_{p05}$ e $R_{b06} \times R_{p11}$.

Figura 32 – Curto-circuito 3 ϕ *close-in* no terminal Disjuntor 05.

Fonte: Próprio autor.

O sexto caso se refere a um curto-circuito *close-in* no terminal Disjuntor 12, o qual deve sensibilizar os relés R01, R02, R03, R04, R05, R06 e R12 conforme destacado em vermelho na Figura 33. Para esta condição o par de relé cuja coordenação é analisada é: $R_{b05} \times R_{p12}$.

Figura 33 – Curto-circuito 3 ϕ *close-in* no terminal Disjuntor 12.

Fonte: Próprio autor.

5

Discussão dos resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes ao algoritmo desenvolvido, bem como sua discussão. Para tanto, este capítulo foi dividido, basicamente, em duas etapas de análise. Na primeira etapa, são apresentados os resultados gerais da rede modelo, apresentando a matriz Z_{barra} , bem como os resultados de cálculo de curto-circuito oriundos de sua manipulação e que serviram como dados de entrada para o algoritmo de otimização proposto. Na segunda etapa, o melhor resultado de curvas de atuação elencado pelo algoritmo é avaliado para os diversos casos de curto-circuito, expostos no capítulo anterior, até a extinção da falta, de forma a validar os resultados do algoritmo de otimização proposto.

5.1 Resultados da Rede Modelo

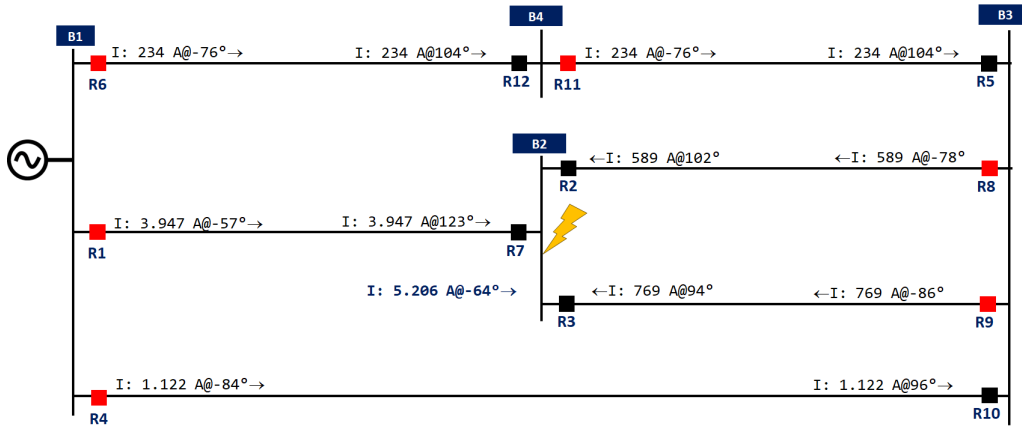
Inicia-se com a representação da Matriz Z_{barra} , a qual foi calculada considerando uma tensão de base de 69 kV e uma potência de base de 100 MVA, resultando nos seguintes valores:

$$Z_{barra} = \begin{bmatrix} 4,2 + 60,4i & 4,2 + 60,4i & 4,2 + 60,4i & 4,2 + 60,4i \\ 4,2 + 60,4i & 71,1 + 144,1i & 35,1 + 94,9i & 16,0 + 71,6i \\ 4,2 + 60,4i & 35,1 + 94,9i & 54,1 + 169,4i & 24,7 + 97,0i \\ 4,2 + 60,4i & 16,0 + 71,6i & 24,7 + 97,0i & 134,1 + 273,5i \end{bmatrix} \times 10^{(-3)}$$

Após o cálculo de Z_{barra} , procedeu-se para a etapa de cálculo das correntes de curto-circuito nas barras e as contribuições nas LTs a partir das Equações 4.1 e 4.2, respectivamente, conforme descrito anteriormente na metodologia.

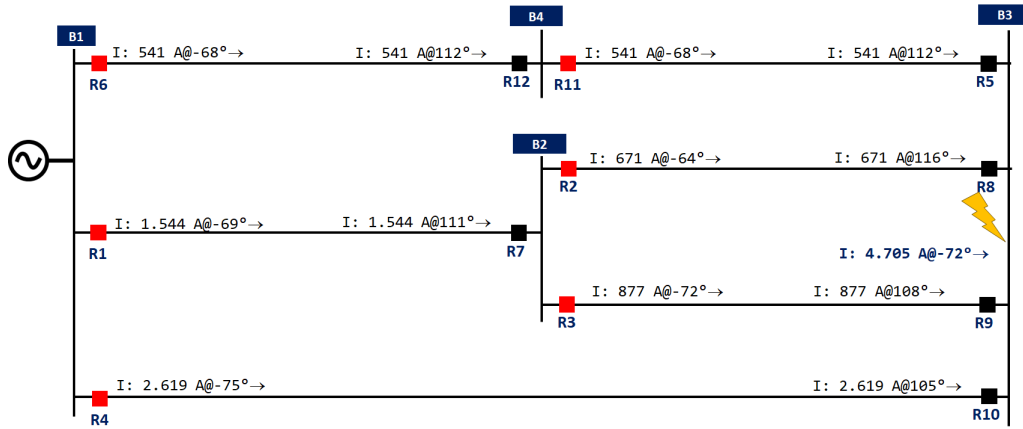
Para o caso de um curto-circuito trifásico na barra 02, tem-se uma corrente de 5.206 A@-72°, com as contribuições das correntes apresentadas conforme Figura 34.

Figura 34 – Curto-circuito 3 ϕ na Barra 02.



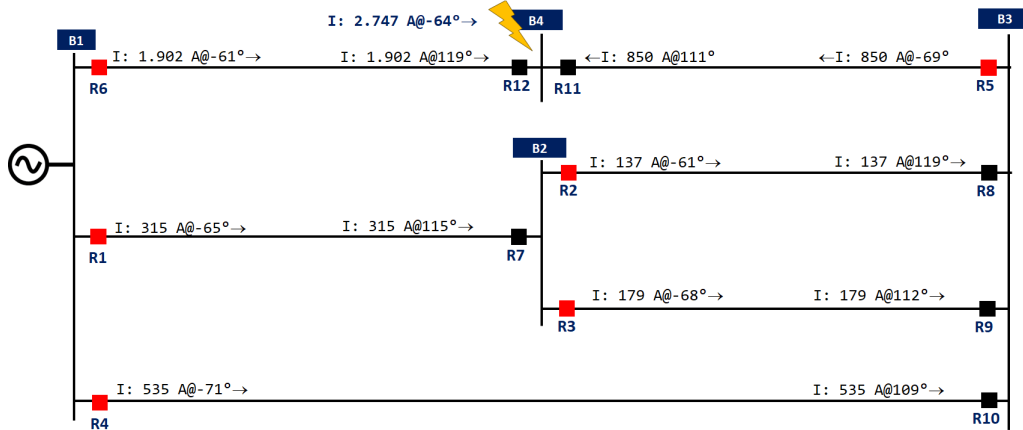
Fonte: Próprio autor.

Para o caso de um curto-circuito trifásico na barra 03, tem-se uma corrente de 4.705 A@-65°, com as contribuições das correntes nas apresentadas conforme Figura 35.

Figura 35 – Curto-circuito 3 ϕ na Barra 03.

Fonte: Próprio autor.

Para o caso de um curto-circuito trifásico na barra 04, tem-se uma corrente de $2.747 \text{ A} @ -64^\circ$, com as contribuições das correntes apresentadas conforme Figura 36.

Figura 36 – Curto-circuito 3 ϕ na Barra 04.

Fonte: Próprio autor.

Vale ressaltar que, diante da direcionalidade dos relés, os disjuntores representados pela cor preta nas Figuras 34, 35 e 36 não terão atuação para a referida

falta simulada, uma vez que suas unidades direcionais permitem atuação apenas para faltas à frente. Os disjuntores representados na cor vermelho serão sensibilizados para a referida falta simulada.

O algoritmo desenvolvido encontrou um conjunto de 26 restrições que devem ser atendidas para as faltas nas Barras e nas LTs da rede simulada. Na Tabela 6 são detalhados os resultados encontrado para as restrições dadas:

Tabela 6 – Restrições do sistema modelo.

R	Tipo	Local	R_b	R_p	$Icc(R_b)$	$Icc(R_p)$	$Ip(R_b)$	$Ip(R_p)$
01	Barra	2	4	8	1.122	589	400,0	400,0
02	Barra	2	4	9	1.122	769	400,0	400,0
03	Barra	3	6	11	548	548	400,0	400,0
04	Barra	3	1	2	1.545	671	400,0	400,0
05	Barra	3	1	3	1.545	877	400,0	400,0
06	Barra	4	4	5	536	850	400,0	400,0
07	Linha	2	1	2	3.948	4.638	400,0	400,0
08	Linha	2	9	2	769	4.638	400,0	400,0
09	Linha	3	1	3	3.948	4.504	400,0	400,0
10	Linha	3	8	3	589	4.504	400,0	400,0
11	Linha	5	2	5	671	4.159	400,0	400,0
12	Linha	5	3	5	877	4.159	400,0	400,0
13	Linha	5	4	5	2.620	4.159	400,0	400,0
14	Linha	7	8	7	589	1.355	400,0	400,0
15	Linha	7	9	7	769	1.355	400,0	400,0
16	Linha	8	3	8	877	4.041	400,0	400,0
17	Linha	8	4	8	2.620	4.041	400,0	400,0
18	Linha	8	11	8	548	4.041	400,0	400,0
19	Linha	9	2	9	671	3.829	400,0	400,0
20	Linha	9	4	9	2.620	3.829	400,0	400,0
21	Linha	9	11	9	548	3.829	400,0	400,0
22	Linha	10	2	10	671	2.093	400,0	400,0
23	Linha	10	3	10	877	2.093	400,0	400,0
24	Linha	10	11	10	548	2.093	400,0	400,0
25	Linha	11	6	11	1.902	1.902	400,0	400,0
26	Linha	12	5	12	850	850	400,0	400,0

Fonte: Próprio autor.

em que,

Tipo, indica se a falta ocorre em uma Barra ou LT.

Local, indica o n^o da Barra (se coluna Tipo indicar uma **Barra**) ou o n^o do relé onde ocorreu o *close-in* (se coluna Tipo indicar **Linha**)

R_b , indica o n^o do relé de *back-up*

R_p , indica o n^o do relé principal

$Icc(R_b)$, indica o valor da corrente (A) de curto-circuito no relé de *back-up*

$Icc(R_p)$, indica o valor da corrente (A) de curto-circuito no relé principal

$I_p(R_b)$, indica o valor da corrente (A) de *pick-up* no relé de *back-up*

$I_p(R_p)$, indica o valor da corrente (A) de *pick-up* no relé principal

Os pares de relés que foram coordenados são aqueles que foram previstos durante a construção do conjunto de restrições identificadas pelo algoritmo na rede modelo e as restrições de tempo de atuação dos relés estão de acordo com o que foi imposto, bem como o intervalo de coordenação entre os elementos. Com os resultados obtidos na otimização, os valores de DTS obtidos foram testados para todos os relés do sistema de forma a avaliar se todas as restrições impostas foram, de fato, atendidas, conforme Tabela 10.

O algoritmo gera um relatório com um resumo de todas as curvas analisadas (05 curvas da família IEC e 05 curvas da família ANSI). Assim, pode-se verificar qual curva traz o melhor resultado com a otimização:

Tabela 7 – Resultado Global da Rede Modelo.

ID	C1	C2	C3	C4	C5	U1	U2	U3	U4	U5	51P	50P
1	0,33	0,42	0,9	0	0,96	3,07	5,17	7,32	4,99	6,61	400	6.370
2	0,07	0,05	0,05	0	0,21	0,73	0,5	0,5	0,5	1,51	400	1.870
3	0,11	0,09	0,07	0	0,32	1,1	0,5	0,9	0,82	2,29	400	1.970
4	0,27	0,41	0,55	0	0,78	2,55	3,88	3,31	7,33	5,44	400	5.440
5	0,11	0,08	0,07	0	0,31	1,06	0,67	0,83	0,76	2,2	400	1.850
6	0,17	0,19	0,17	0	0,52	2,14	1,59	3,62	1,64	4,52	400	4.940
7	0,05	0,05	0,05	0	0,05	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	400	OFF
8	0,06	0,05	0,05	0	0,16	0,5	0,5	0,5	0,5	1,13	400	1.630
9	0,09	0,07	0,05	0	0,27	0,92	0,52	0,65	0,59	1,91	400	1.690
10	0,05	0,05	0,05	0	0,05	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	400	630
11	0,05	0,05	0,05	0	0,13	0,5	0,5	0,5	0,5	0,92	400	960
12	0,05	0,05	0,05	0	0,05	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	400	OFF
FOb	5,21	4,01	4,5	0	2,31	4,2	5,6	4,16	3,87	2,5		
TMx	1	1	1,5	0	0,5	0,75	1,25	1	1,25	0,5		
TSi	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100		
TSO	20	31	41	0	23	1	7	15	35	5		
NSO	11	86	57	0	26	21	45	85	21	5		
TPS	10	50	30	0	20	20	30	50	20	10		
VPS	3	2	1	0	2	1	1	1	1	1		
TIIt	11	47	39	0	14	12	25	30	50	14		

Fonte: Próprio autor.

em que,

ID: Identificação do Relé

51P: *Pick-up* do Relé de Sobrecorrente Temporizado Fase, dado em (A)

50P: *Pick-up* do Relé de Sobrecorrente Instantâneo Fase, dado em (A)

FOb: Soma de Tempo da Função Objetivo, dado em (s)

TMx.: Limite Máximo de Tempo para eliminação de falta na barra oposta ao relé, dado em (s)

TSi: Total casos simulados

TSO: Quantidade de casos com solução ótima encontrada

NSO: Número do melhor caso com solução ótima encontrada

TPS: Total de partículas do enxame no melhor caso com solução ótima encontrada

VPS: Velocidade das partículas do enxame no melhor caso com solução ótima encontrada

TIt: Quantidade de iterações necessárias para o melhor caso com solução ótima encontrada

O sistema modelo com 04 barras e 06 linhas de transmissão adotado nesta pesquisa, obteve soluções ótima para 09 das 10 curvas otimizadas demandando um tempo total médio de processamento de cerca de 200 s.

A partir da análise da Tabela 7, pode-se verificar que a curva IEC C4 LTI (*Long Time Inverse*) não convergiu para uma solução ótima em nenhum dos 20 casos simulados. Além disso, para as curvas IEC C3 EI (*Extremely Inverse*), IEEE U2 I (*Inverse*) e IEEE U4 EI (*Extremely Inverse*) embora tenham convergido e encontrado soluções ótimas em 41, 07 e 35 casos, respectivamente, as melhores soluções foram na condição de Limite Máximo de Tempo para eliminação de falta na barra oposta ao relé em 1,5 s para curva IEC C3 EI e em 1,25 s para as IEEE U2 I e IEEE U4 EI, o que na prática já é considerado elevado para curtos-circuitos dessa natureza.

Verifica-se também que a curva com menor percentual de casos convergidos são IEEE U1 MI (*Moderate Inverse*), para qual, as simulações encontraram apenas uma solução ótima nos 100 casos analisados, ao tempo que a simulação com curva IEC C3 EI (*Extremely Inverse*) encontrou 41 casos convergidos.

Outra observação é que entre as melhores soluções de cada curva analisada, só não houve convergência para população do enxame com 40 partículas simuladas, sendo que as simulações que mais convergiram foram

com 20 partículas no enxame e ocorreram em simulações em três curvas analisadas (IEC C5 STI, IEEE U1 I e IEEE U4 EI).

Por fim, verifica-se que as curvas IEC C5 STI (*Short Time Inverse*) e IEEE U5 STI (*Short Time Inverse*) foram as melhores curvas que convergiram. A curva IEC C5 STI apresentou um melhor resultado, pois, sua Função Objetivo somou o tempo entre todas as curvas (**2,31 s**) e o Limite Máximo de Tempo para eliminação de falta na barra oposta ao relé em **0,5 s**, ou seja, o menor tempo simulado no algoritmo, promovendo assim, uma eliminação de defeitos na barra em um tempo curto e satisfatório para as condições analisadas.

Desta forma, na próxima seção são apresentados os resultados de parametrização e coordenogramas obtidos para cada relé do sistema a partir da aplicação da curva IEC C5 STI. Além disso, também são apresentadas as sequências de operação e tempos de atuação para as diversas situações de curto simuladas a fim de validar a otimização a partir da curva supracitada.

5.1.1 Curvas do Relé com melhor resultado

Na Tabela 8 são apresentados todos os casos simulados para a curva **IEC C5 STI**, com destaque para o caso destacado como o melhor, conforme verificado na Tabela 7:

Tabela 8 – Casos Analisados

Caso	TPS	M.I.	VPS	Restr.	TIIt	RNS	FOb
01	10	50	1	26	07	01	2,264 s
02	10	50	2	26	11	03	2,310 s
03	10	50	3	26	24	00	2,363 s
04	10	50	4	26	13	01	2,259 s
25	20	100	1	26	02	09	1,766 s
26	20	100	2	26	14	00	2,305 s
27	20	100	3	26	10	03	2,342 s
28	20	100	4	26	12	04	2,212 s
49	30	150	1	26	06	02	2,359 s
50	30	150	2	26	13	02	2,347 s
51	30	150	3	26	04	15	1,475 s
52	30	150	4	26	06	11	1,911 s
73	40	200	1	26	09	00	2,402 s
74	40	200	2	26	07	13	1,964 s
75	40	200	3	26	08	05	2,287 s
76	40	200	4	26	09	05	2,287 s
97	50	250	1	26	10	00	2,402 s
98	50	250	2	26	09	05	2,287 s
99	50	250	3	26	12	05	2,287 s
100	50	250	4	26	08	06	2,147 s

Fonte: Próprio autor.

em que,

M.I. é o número máximo de iterações;

Restr. é o total de restrições da rede analisada;

RNS é número de restrições não resolvidas;

De um total de 100 casos simulados, em 23 casos o algoritmo encontrou uma solução ótima. A melhor solução encontrada foi no caso 26 com 20 partículas no enxame, 100 iterações e velocidade 2. Das 26 restrições analisadas, após 14 iterações, 0 restrições não foram sanadas. O somatório de tempo da função objetivo foi de 2,305 segundos, considerando um limite de tempo para atuação na barra oposta de 30 ciclos.

Os resultados do algoritmo de otimização podem ser vistos na Tabela 9, que contém os valores de DTS dos relés da rede modelo.

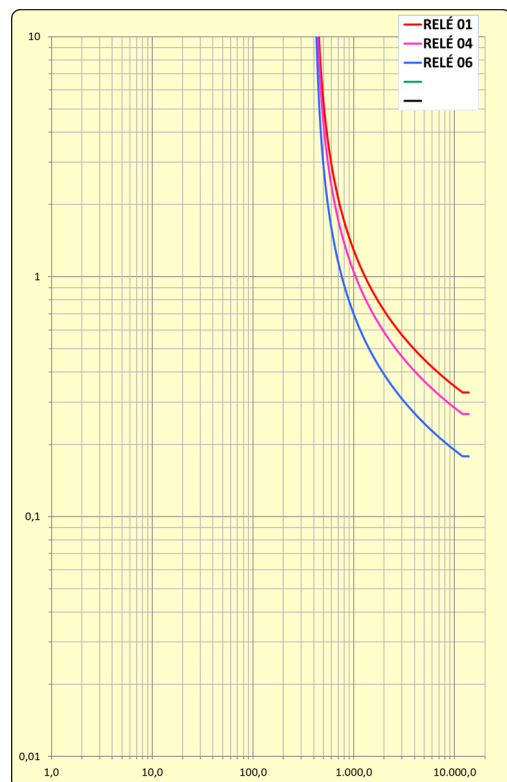
Tabela 9 – DTS Resultados da otimização.

Relé	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
DTS	0,96	0,21	0,32	0,78	0,30	0,52	0,05	0,15	0,26	0,05	0,12	0,05

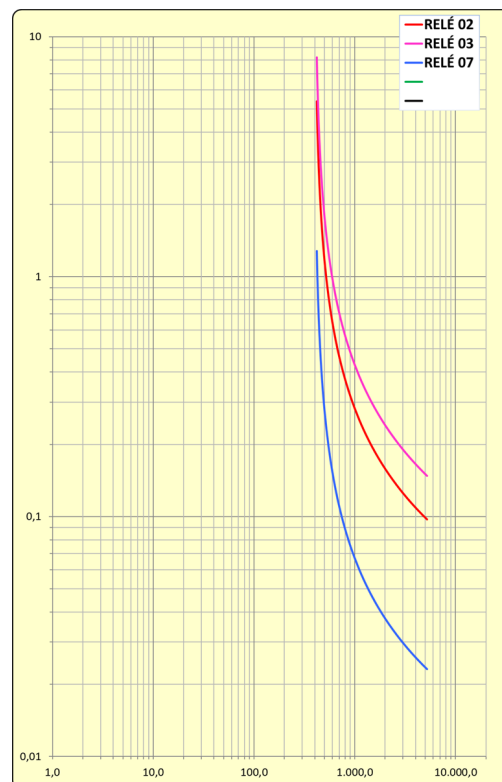
Fonte: Próprio autor.

As curvas obtidas a partir do processo de otimização são apresentadas no conjunto de imagens da Figura 37, na qual, na Figura A são apresentadas as curvas dos relés adjacentes a barra 01 (Relés 01, 04 e 06). Na Figura B, tem-se as curvas dos relés adjacentes a barra 02 (Relés 02, 03 e 07). Para a Figura C, são ilustradas as curvas dos relés adjacentes a barra 03 (Relés 05, 08, 09 e 10). Por fim, na Figura D, são apresentadas as curvas dos relés adjacentes a barra 04 (Relés 11 e 12).

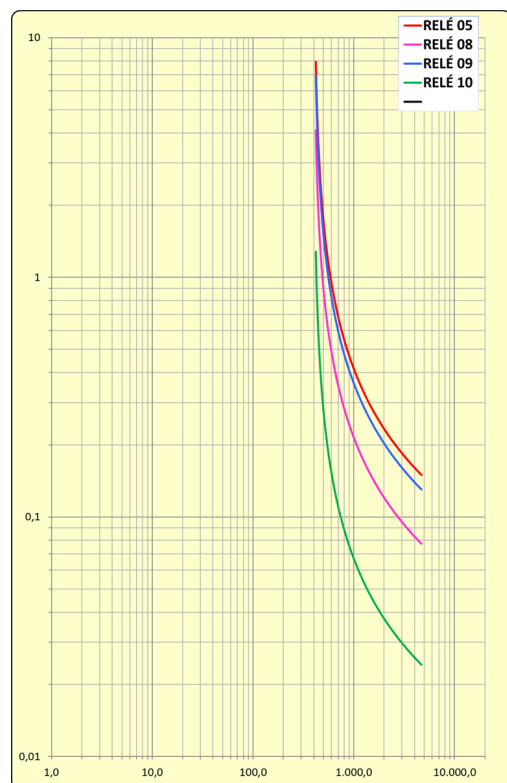
Figura 37 – Curvas otimizadas do Relés da Rede Modelo



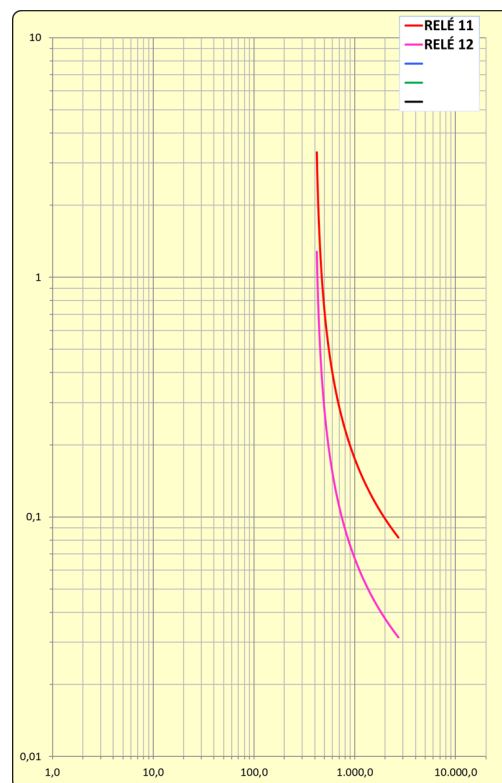
(a) Figura A



(b) Figura B



(c) Figura C



(d) Figura D

Fonte: Próprio autor.

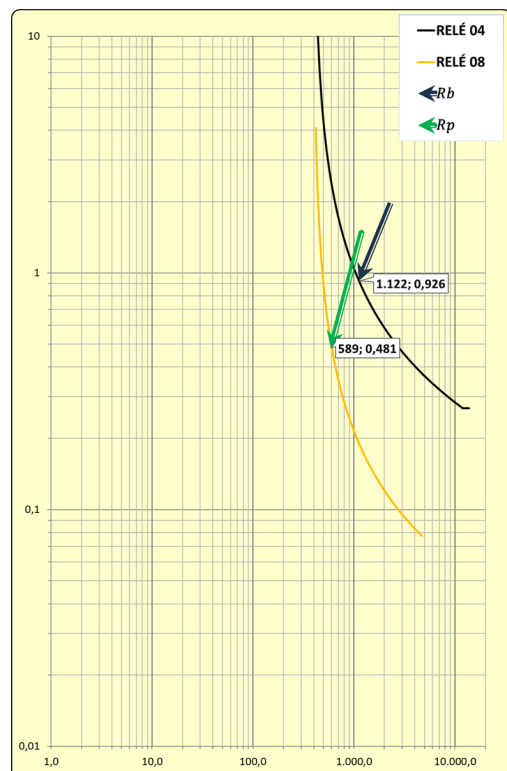
Tabela 10 – Tempo de Operação para os casos de restrições.

Restr.	$t(R_b)$	$t(R_p)$	Δ_t	Restr.	$t(R_b)$	$t(R_p)$	Δ_t
01	0,927	0,500	0,427	14	0,500	0,050	0,450
02	0,927	0,500	0,427	15	0,500	0,050	0,450
03	2,048	0,500	1,548	16	0,500	0,081	0,419
04	0,863	0,500	0,363	17	0,500	0,081	0,419
05	0,863	0,500	0,363	18	0,503	0,081	0,419
06	3,324	0,500	2,824	19	0,500	0,140	0,360
07	0,500	0,102	0,398	20	0,500	0,140	0,360
08	0,500	0,102	0,398	21	0,500	0,140	0,360
09	0,500	0,157	0,343	22	0,500	0,037	0,463
10	0,500	0,157	0,343	23	0,500	0,037	0,463
11	0,500	0,156	0,344	24	0,500	0,037	0,463
12	0,500	0,156	0,344	25	0,404	0,099	0,305
13	0,500	0,156	0,344	26	0,500	0,082	0,418

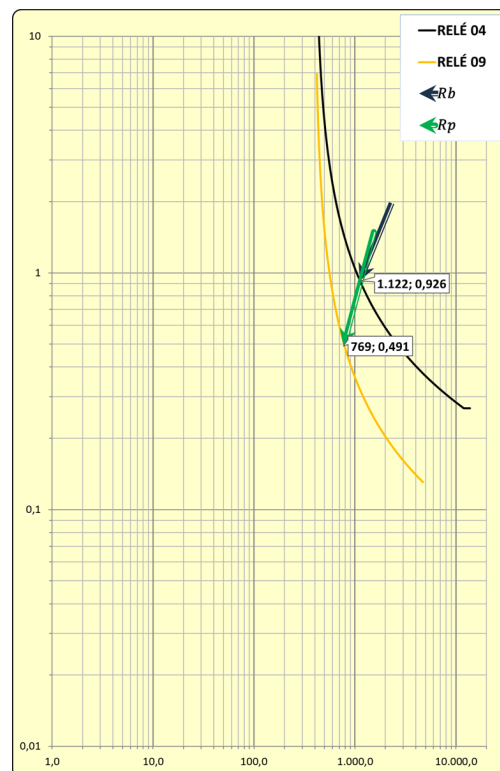
Fonte: Próprio autor.

Alguns casos de coordenação das curvas para melhor verificação das condições de restrições (ver Tabelas 6 e 10) são apresentadas no conjunto de imagens da Figura 38, na qual, na Figura A são apresentadas as curvas dos relés da restrição 01, na qual o relé 04 atua como retaguarda e o relé 08 como principal para um curto-circuito na Barra 02. Na Figura B, tem-se as curvas dos relés da restrição 02, com o relé 04 como retaguarda e o relé 09 como principal para um curto-circuito na Barra 02. Para a Figura C, são ilustradas as curvas dos relés da restrição 14, na qual tem-se o relé 08 como retaguarda e o relé 07 como principal para um curto-circuito *close-in* no relé 07. Por fim, na Figura D são apresentadas as curvas dos relés da restrição 15, na qual tem-se o relé 09 como retaguarda e o relé 07 como principal para um curto-circuito *close-in* no relé 07. Nos coordenogramas apresentados nas Figuras A, B, C e D, pode-se notar que o critério do CTI adotado (300 ms) no processo de otimização foi perfeitamente atendido para garantir a coordenação entre as curvas de atuação dos relés.

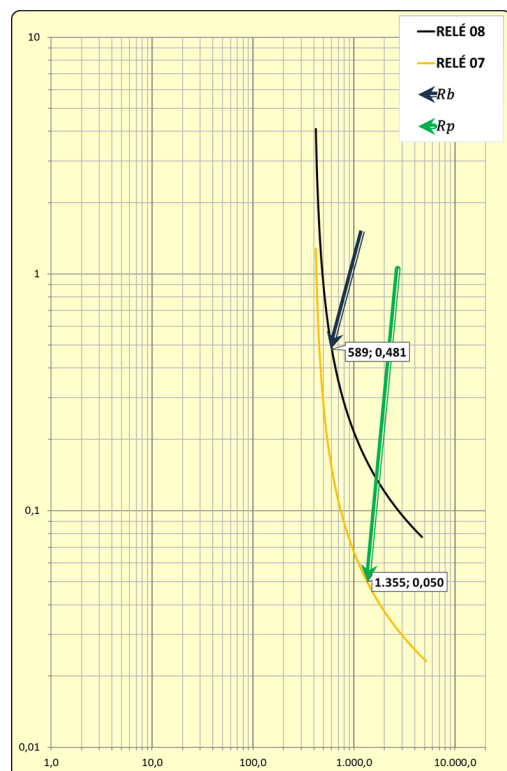
Figura 38 – Coordenação dos Relés p/ os casos 01, 02, 14 e 15 da Rede Modelo



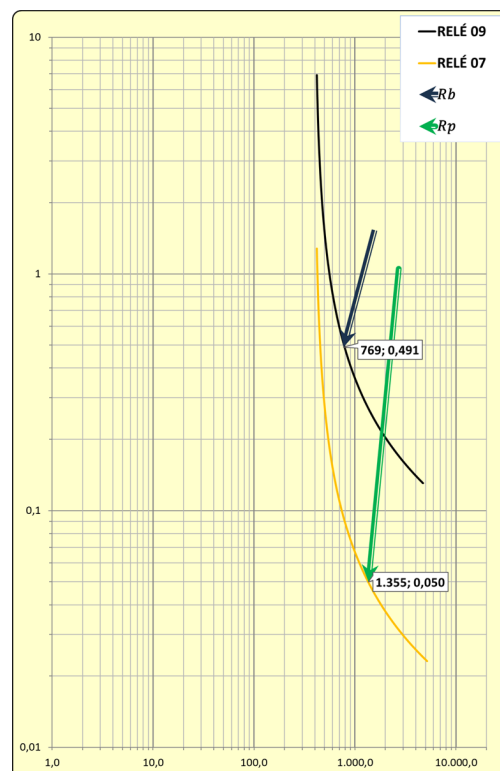
(a) Figura A



(b) Figura B



(c) Figura C



(d) Figura D

Fonte: Próprio autor.

5.1.1.1 Análise da eliminação de falta

Para eliminação de faltas na barra 02, será necessário um total de 03 aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 515 *ms*, conforme apresentado na Tabela 11.

Para esta situação de curto-circuito, o relé 01, por ser adjacente à barra *swing*, não possui relé de retaguarda com o qual deve ser verificado coordenação. No 1º instante da falta, o relé 08 atua, em seguida, novas correntes são verificadas pelos relés remanescentes (em função de alterações na impedância equivalente do sistema), promovendo a atuação simultânea dos relés 09 e 01. Assim, pode-se verificar que o algoritmo conseguiu atender com os critérios de coordenação, conforme sequência de operação exposta na Tabela 11.

Tabela 11 – Falta na Barra 02.

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	08	589	0,499	A	04	1.122	0,926	F	0,427
01	09	769	0,500	F	04	1.122	0,926	F	0,426
01	01	3.947	0,500	F	NA	-	-	-	-
02	09	976	0,016	A	04	808	0,868	F	0,852
02	01	4.067	0,016	A	NA	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor.

Para eliminação de faltas na barra 03, será necessário um total de 04 aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 515 *ms*, conforme apresentado na Tabela 12.

Para esta situação de curto-circuito, o relé 04 por ser adjacente à barra *swing*, não possui, neste estudo, relé de retaguarda com o qual deve ser verificado coordenação. No 1º instante da falta, o relé 03 atua, em seguida, novas correntes são verificadas pelos relés remanescentes (em função de alterações na impedância equivalente do sistema), promovendo a atuação simultânea dos relés 11, 02 e 04. Assim, pode-se verificar que o algoritmo conseguiu atender com os critérios de coordenação, conforme sequência de operação exposta na Tabela 12.

Tabela 12 – Falta na Barra 03.

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	11	548	0,500	F	06	548	2,048	F	1,548
01	02	671	0,500	F	01	1.544	0,863	F	0,363
01	03	876	0,499	A	01	1.544	0,863	F	0,364
01	04	2.619	0,500	F	NA	-	-	-	-
02	11	575	0,016	A	06	575	1,270	F	1,254
02	02	883	0,016	A	01	883	0,989	F	0,973
02	04	2.752	0,016	A	NA	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor.

Para eliminação de faltas na barra 04, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 424 *ms*, conforme apresentado na Tabela 13.

Para esta situação de curto-circuito, o relé 06 por ser adjacente à barra *swing*, não possui, neste estudo, relé de retaguarda com o qual deve ser verificado coordenação. No 1° instante da falta, o relé 06 atua, em seguida, novas correntes são verificadas pelos relés remanescentes (em função de alterações na impedância equivalente do sistema), promovendo a atuação do relé 05. Assim, pode-se verificar que o algoritmo conseguiu atender com os critérios de coordenação, conforme sequência de operação exposta na Tabela 13.

Tabela 13 – Falta na Barra 04.

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	05	850	0,500	F	04	535	3.323	F	2.823
01	06	1.901	0,403	A	NA	-	-	-	-
02	05	969	0,021	A	04	610	1.882	F	1.861

Fonte: Próprio autor.

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 01, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 377 *ms*, conforme apresentado na Tabela 14.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 01 (adjacente à barra *swing*), não há circulação de corrente de falta nas LTs

do sistema, pois a impedância de *Thévenin* no ponto da falta é igual a impedância da fonte (única) do sistema, portanto, no 1º instante da falta, nenhuma corrente é vista pelo relé 07. Entretanto, após atuação do relé 01, o relé 07 detecta a corrente de curto-circuito e atua de forma coordenada com o relé de retaguarda 09, conforme sequência de operação exposta na Tabela 14.

Tabela 14 – Falta *close-in* no relé 01.

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	01	13.829	0,329	A	NA	-	-	-	-
01	07	-	-	F	09	-	-	F	-
02	07	1.395	0,048	A	09	792	0,469	F	0,421

Fonte: Próprio autor.

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 02, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 181 *ms*, conforme apresentado na Tabela 15.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 02, este tem uma atuação para 4,64 kA em 108 ms e após sua atuação, em mais 79 ms o relé 08 (que pertence a mesma LT do relé 02) tem a sua atuação realizada, eliminando um defeito simulado na LT. Ambos relés tem atuação coordenada com os respectivos relés de retaguarda, conforme sequência de operação exposta na Tabela 15.

Tabela 15 – Falta *close-in* no relé 02.

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	02	4.638	0,102	A	01	3.947	0,501	F	0,399
01	08	589	0,481	F	04	1.122	0,926	F	0,445
02	08	1.145	0,079	A	04	712	1.568	F	1.489

Fonte: Próprio autor.

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 03, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 262 *ms*, conforme apresentado na Tabela 16.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 03, este tem uma atuação para 4,5 kA em 156 ms e após sua atuação, em mais 106 ms o relé 09 (que pertence a mesma LT do relé 03) tem a sua atuação realizada, eliminando um defeito simulado na LT. Ambos relés tem atuação coordenada com os respectivos relés de retaguarda, conforme sequência de operação exposta na Tabela 16.

Tabela 16 – Falta *close-in* no relé 03.

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	03	4.503	0,156	A	01	3.947	0,501	F	0,345
01	09	769	0,491	F	04	1.122	0,926	F	0,435
02	09	1.369	0,106	A	04	896	1,034	F	0,928

Fonte: Próprio autor.

As demais faltas *close-in* possíveis existentes no sistema avaliado apresentaram atuações da proteção semelhantes às apresentadas neste capítulo, conforme pode ser verificado no Apêndice A deste trabalho.

6

Conclusões

Os sistemas de proteção precisam cada vez mais serem dotados de eficiência, segurança e seletividade e para isso, o uso de técnicas de otimização é fundamental para o alcances desses propósitos. A pesquisa realizada nesta dissertação insere-se nesse contexto e focou no problema da coordenação dos relés de sobrecorrente direcionais em redes de subtransmissão em anel. Para solução do problema, empregou-se o algoritmo de *Particle Swarm Optimization* (PSO) aliado a técnicas de verificação automática das condições de restrições do sistema analisado.

O problema formulado buscava encontrar soluções ótimas que atendessem a minimização dos tempos de atuação dos relés de sobrecorrentes direcionais para todos os locais de falta (barras ou *close-in*) do sistema analisado, sem comprometer a seletividade, confiabilidade e a sensibilidade. Outro foco do problema é a aplicabilidade, pois a aplicação desenvolvida deveria ser necessariamente prática e de fácil utilização pelos usuários, então, desenvolveu-se uma ferramenta que exige o mínimo de informações como dados de entrada, dispensando inclusive o cálculo das correntes de curto-circuito em aplicações externas, não necessitando informações sobre a posição e numeração dos relés, tendo apenas como dados de entrada a impedância da linha de transmissão, ligação das barras e ampacidade dos cabos utilizados.

Ainda no desenvolvimento da aplicação, buscou-se que o próprio algoritmo identifique a função objetivo a ser minimizada acrescida da função penalidade em razão das restrições impostas na formulação do problema. Concluída a etapa do processo de otimização, a aplicação verifica as condições de eliminação total do curto-circuito, bem como analisa os ajustes encontrados nas condições de contingência do sistema elétrico. Esse conjunto de soluções são testados para 10 curvas adotadas nos relés de proteção, o que traz maior robustez ao algoritmo, uma vez que ampliado o espaço de busca do algoritmo torna-se mais eficiente a solução encontrada, pois não deixa nenhuma opção das curvas disponíveis nos relés de sobrecorrente sem a devida análise do algoritmo.

Ao final, conclui-se que o algoritmo PSO aliado as técnicas de verificação das restrições conseguiu promover resultados satisfatórios para o problema formulado, onde todas as hipóteses aplicadas no sistema teste foram atendidas e as restrições superadas, com o objetivo principal atendido, ou seja, avaliar os parâmetros de configuração das curvas dos relés de sobrecorrente, de modo que seja oferecida uma solução otimizada que apresente os menores tempos de atuação e garanta a coordenação entre os relés para todas as situações de contingência avaliadas, ou seja, que tenha os menores tempos de atuação e ainda permita a garantia da coordenação entre os relés.

6.1 Sugestão para futuros trabalhos

Sugerem-se os seguintes temas para a continuidade do trabalho:

1. Adaptação do algoritmo com sistema preparado para múltiplas fontes, incluído geração distribuída (fontes Usinas Fotovoltaicas e Usinas Solares).
2. Adaptar o algoritmo para considerar curvas alternadas entre os relés na busca da melhor solução.
3. Explorar as características do algoritmo PSO, visando redução do esforço computacional e portanto, do tempo de processamento.

4. Adaptação do algoritmo para simulação de redes com Linhas Radiais e derivações radiais sem equipamentos de disjunção no ponto de derivação.
5. Adaptação do algoritmo para simulação de otimização de ajustes para curtos-circuitos monofásicos.

Referências

- 60255-3, I. *IEC 60255-3: electrical relays – part 3: single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time*. [S.l.]: IEC, 1989. Citado na página 31.
- ALAE, P.; AMRAE, T. Optimal coordination of directional overcurrent relays in meshed active distribution network using imperialistic competition algorithm. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, v. 9, n. 2, p. 416–422, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 65.
- BANGAR, P. A.; KALAGE, A. A. Optimum coordination of overcurrent and distance relays using jaya optimization algorithm. In: *2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 65.
- BERNARDES, W. M. S. *Algoritmo Enxame de Partículas Discreto para Coordenação de Relés Direcionais de Sobrecorrente em Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 29, 36 e 68.
- BERNARDES, W. M. S. Coordenação de relés direcionais de sobrecorrente por meio de evolutionary particle swarm optimization. *Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ*, 2013. Citado na página 19.
- BOTTURA, F. B. *Algoritmo de Otimização Híbrido para a Coordenação de Relés Direcionais de Sobrecorrente em um Sistema Elétrico Malhado*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Federal de São Paulo / São Carlos, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 21, 37, 38, 57 e 68.
- CAMPOS, M. V. S. *Otimização de Ajustes de Relés de Sobrecorrente em Linhas de Subtransmissão*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Sergipe, 2025. Citado na página 65.
- CAMPOS, M. V. S.; XAVIER, G. V. R. Otimização de ajustes de relés de sobrecorrente em linhas de subtransmissão em anel. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, Ponta Grossa - PR, 2025. Citado na página 24.
- CAMPOS, M. V. S.; XAVIER, G. V. R.; NETO, D. D. Otimização de ajustes de relés de sobrecorrente em linhas de subtransmissão em anel. *Seminário Nacional de Distribuição – SENDI*, Belo Horizonte - MG, 2025. Citado na página 24.

DEEP, K.; BANSAL, J. C. Optimization of directional overcurrent relay times using laplace crossover particle swarm optimization (lpxso). In: *2009 World Congress on Nature Biologically Inspired Computing (NaBIC)*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 288–293. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 65.

EBERHART, R.; SHI, Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In: *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512)*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 84–88 vol.1. Citado na página 55.

FAGUNDES, A. R. *Coordenação de relés de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência utilizando Metaheurísticas Bio-inspiradas: uma abordagem considerando o algoritmo de busca dos cucos via voos de Lévy*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Federal do Pampa, 2020. Citado 8 vezes nas páginas 21, 27, 28, 29, 34, 35, 53 e 61.

FAGUNDES ARIAN RODRIGUES, S. E. M. S. C. D. L. Inverse time directional overcurrent relays optimal coordination using nonlinear programming and cuckoo search algorithm improved by lévy flights. *Brazilian Journal of Development*, v. 1, 2025. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 65.

FILHO, A. M. F. *Desenvolvimento de circuitos equivalentes para o cálculo de faltas simultâneas na mesma localidade com modelagem em componentes simétricas*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2019. Citado na página 40.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948 vol.4. Citado na página 53.

KHURSHAID, T. et al. An improved optimal solution for the directional overcurrent relays coordination using hybridized whale optimization algorithm in complex power systems. *IEEE Access*, v. 7, p. 90418–90435, 2019. Citado na página 65.

KINDERMANN, G. *Curto-Circuito*. 2^a. ed. Porto Alegre: Editora Afiliada, 1997. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 43 e 45.

KORASHY, A. et al. Optimal coordination of standard and non-standard direction overcurrent relays using an improved moth-flame optimization. *IEEE Access*, v. 8, p. 87378–87392, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 65.

KORASHY, A. et al. Solving optimal coordination of direction overcurrent relays problem using grey wolf optimization (gwo) algorithm. In: *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 621–625. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 65.

LANGAZANE, S. N.; SAHA, A. K. Effects of particle swarm optimization and genetic algorithm control parameters on overcurrent relay selectivity and speed. *IEEE Access*, v. 10, p. 4550–4567, 2022. Citado na página 55.

LANGAZANE, S. N.; SAHA, A. K. Effects of particle swarm optimization and genetic algorithm control parameters on overcurrent relay selectivity and speed. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 10, p. 4550–4567, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109%2Faccess.2022.3140679>>. Citado na página 65.

MAMEDE, J. M. F. D. R. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Citado na página 41.

MIN, W. Analysis on bubble sort algorithm optimization. In: *2010 International Forum on Information Technology and Applications*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 1, p. 208–211. Citado na página 68.

MORO, V. de C. *Metodologia para Coordenação Otimizada entre Relés de Distância e Direcionais de Sobrecorrente em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 39.

NEGRÃO, D. L. A. *Metodologia Para a Coordenação e Seletividade da Proteção Direcional de Sobrecorrente em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 38, 40 e 57.

ONS. *Sistema de Proteção*. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/glossario>>. Acesso em: 09 jun 2023. Citado na página 19.

PAIVA, F. A. P. de. *Otimização por enxame de partículas*. 1. ed. Natal: editoraifrn, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 51, 52 e 54.

PEREIRA, R. L. de A. *Proposição de Algoritmos Baseados em Evolução Diferencial e Programação Linear para Coordenação Ótima de Relés de Sobrecorrente*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Federal de Campina Grande, 2021. Citado 10 vezes nas páginas 18, 20, 21, 27, 28, 34, 35, 36, 62 e 65.

SATO, W. F. F. *Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. Citado na página 46.

SHAH, P. A.; NANOTY, A. S.; RAJPUT, V. N. Comparative analysis of different optimization methods for optimal coordination of directional

- overcurrent relays. In: *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 3927–3931. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 65.
- SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. In: *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 69–73. Citado na página 55.
- SHI, Y.; EBERHART, R. Empirical study of particle swarm optimization. In: *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 3, p. 1945–1950 Vol. 3. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 79.
- SILVA, E. C. da. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Guia prático de ajustes*. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualimark Editora, 2014. Citado na página 19.
- SILVA, M. A. de A. *Otimização da Parametrização de Relés em Sistemas Radiais de Distribuição de Energia Elétrica com utilização do Algoritmo Genético*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Federal do Rio Grande do Norte, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 59.
- SOUZA, L. A. P. de. *Comparação entre Métodos de Otimização aplicados aos Ajustes de Relés Direcionais de Sobrecorrente*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Federal de Goiás, 2019. Citado 8 vezes nas páginas 20, 25, 26, 35, 36, 38, 39 e 60.
- STDC37.112, I. *IEEE Std C37.112-2018 (Revision of IEEE Std C37.112-1996): IEEE Standard for Inverse-Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays*. IEEE, 2018. ISBN 9781504453516. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=kAjSxgEACAAJ>>. Citado na página 30.

Apêndices

APÊNDICE

A

Análise da eliminação de falta

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 04, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 311 *ms*, conforme apresentado na Tabela 17.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 04 (adjacente à barra *swing*) não há circulação de corrente de falta nas LTs do sistema, pois a impedância de *Thévenin* no ponto da falta é igual a impedância da fonte (única) do sistema, portanto, no 1º instante da falta, nenhuma corrente é vista pelo relé 10. Entretanto, após atuação do relé 04, o relé 10 detecta a corrente de curto-circuito e atua de forma coordenada com o relé de retaguarda 02, conforme sequência de operação exposta na Tabela 17.

Tabela 17 – Falta *close-in* no relé 04

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	04	13.829	0,267	A	NA	-	-	-	-
01	10	-	-	F	NA	-	-	-	-
02	10	1.546	0,044	A	02	496	1,210	F	1,166

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 05, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 225 *ms*, conforme apresentado na Tabela 18.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 05, este tem uma atuação para 4,16 kA em 153 ms e após sua atuação, em mais 72 ms o relé 11 (que pertence a mesma LT do relé 05) tem a sua atuação realizada, eliminando um defeito simulado na LT. Ambos relés tem atuação coordenada com os respectivos relés de retaguarda, conforme sequência de operação exposta na Tabela 18.

Tabela 18 – Falta *close-in* no relé 05

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	05	4.159	0,153	A	02	671	0,502	F	0,349
01	11	548	0,473	F	06	548	2,052	F	1,579
02	11	771	0,072	A	06	771	0,824	F	0,752

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 06, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 292 ms, conforme apresentado na Tabela 19.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 06 (adjacente à barra *swing*) não há circulação de corrente de falta nas LTs do sistema, pois a impedância de *Thévenin* no ponto da falta é igual a impedância da fonte (única) do sistema, portanto, no 1° instante da falta, nenhuma corrente é vista pelo relé 12. Entretanto, após atuação do relé 06, o relé 12 detecta a corrente de curto-circuito e atua de forma coordenada com o relé de retaguarda 05, conforme sequência de operação exposta na Tabela 19.

Tabela 19 – Falta *close-in* no relé 06

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	06	13.829	0,178	A	NA	-	-	-	-
01	12	-	-	F	NA	-	-	-	-
02	12	685	0,114	A	05	685	0,702	F	0,588

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 07, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 477 ms, conforme apresentado na Tabela 20.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 07, este tem uma atuação para 1,35 kA em 50 ms e após sua atuação, em mais 427 ms

o relé 01 (que pertence a mesma LT do relé 07) tem a sua atuação realizada, eliminando um defeito simulado na LT. Relé 07 tem atuação coordenada com o seu relé de retaguarda, conforme sequência de operação exposta na Tabela 20.

Tabela 20 – Falta *close-in* no relé 07

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	07	1.355	0,050	A	09	769 0,491	F	0,441	
01	01	3.947	0,498	F	NA	-	-	-	-
02	01	4.375	0,427	A	NA	-	-	-	-

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 08, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 235 *ms*, conforme apresentado na Tabela 21.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 08, este tem uma atuação para 4,04 kA em 77 ms e após sua atuação, em mais 158 ms o relé 02 (que pertence a mesma LT do relé 08) tem a sua atuação realizada, eliminando um defeito simulado na LT. Ambos relés tem atuação coordenada com os respectivos relés de retaguarda, conforme sequência de operação exposta na Tabela 21.

Tabela 21 – Falta *close-in* no relé 08

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	08	4.040	0,077	A	03	876	0,502	F	0,425
01	02	671	0,502	F	01	1.544	0,865	F	0,363
02	02	1.183	0,158	A	01	972	1,248	F	1.090

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 09, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 302 *ms*, conforme apresentado na Tabela 22.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 09, este tem uma atuação para 3,83 kA em 137 ms e após sua atuação, em mais 165 ms o relé 03 (que pertence a mesma LT do relé 09) tem a sua atuação realizada, eliminando um defeito simulado na LT. Ambos relés tem atuação

coordenada com os respectivos relés de retaguarda, conforme sequência de operação exposta na Tabela 22.

Tabela 22 – Falta *close-in* no relé 09

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	09	3.828	0,137	A	02	671	0,502	F	0,325
01	03	876	0,502	F	01	1.544	0,865	F	0,363
02	03	1.443	0,165	A	01	1.218	915	F	0,750

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 10, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 460 *ms*, conforme apresentado na Tabela 23.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 10, este tem uma atuação para 2,09 kA em 37 ms e após sua atuação, em mais 423 ms o relé 04 (que pertence a mesma LT do relé 10) tem a sua atuação realizada, eliminando um defeito simulado na LT. Relé 10 tem atuação coordenada com o seu relé de retaguarda, conforme sequência de operação exposta na Tabela 23.

Tabela 23 – Falta *close-in* no relé 10

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	10	2.092	0,037	A	02	671	0,502	F	0,465
01	04	2.619	0,500	F	NA	-	-	-	-
02	04	3.058	0,423	A	NA	-	-	-	-

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 11, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 360 *ms*, conforme apresentado na Tabela 24.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 11, este tem uma atuação para 1,9 kA em 37 ms e após sua atuação, em mais 323 ms o relé 05 (que pertence a mesma LT do relé 11) tem a sua atuação realizada, eliminando um defeito simulado na LT. Ambos relés tem atuação coordenada com os respectivos relés de retaguarda, conforme sequência de operação exposta na Tabela 24

Tabela 24 – Falta *close-in* no relé 11

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	11	1.901	0,037	A	06	1.901	0,404	F	0,311
01	05	850	0,490	F	04	535	3,333	F	2,843
02	05	969	0,323	A	04	610	2,189	F	1,866

Para eliminação de faltas *close-in* no relé 12, será necessário um total de duas aberturas, com tempo total de eliminação de falta em 388 *ms*, conforme apresentado na Tabela 25.

Para esta situação de curto-circuito, uma falta *close-in* no relé 12, este tem uma atuação para 850 A em 82 ms e após sua atuação, em mais 306 ms o relé 06 (que pertence a mesma LT do relé 12) tem a sua atuação realizada, eliminando um defeito simulado na LT. Relé 12 tem atuação coordenada com o seu relé de retaguarda, conforme sequência de operação exposta na Tabela 25.

Tabela 25 – Falta *close-in* no relé 12

Etapa	Relé principal				Relé retaguarda				$\Delta_t(s)$
	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	ID	$I_{cc}(A)$	$t(s)$	Estado	
01	12	850	0,082	A	05	850	0,490	F	0,408
01	06	1.901	0,404	F	NA	-	-	-	-
02	06	2.020	0,306	A	NA	-	-	-	-