



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

LUCA MACÊDO MARTINS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS À
PROTEÇÃO ADAPTATIVA DE RELÉS EM REDES COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

FORTALEZA

2023

LUCA MACÊDO MARTINS

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS À
PROTEÇÃO ADAPTATIVA DE RELÉS EM REDES COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

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

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

Coorientador: Prof. Me. Felipe Carvalho Sampaio.

FORTALEZA

2023

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

M344a Martins, Luca Macêdo.

Análise comparativa de métodos de otimização aplicados à proteção adaptativa de relés em redes com geração distribuída / Luca Macêdo Martins. – 2023.
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

Coorientação: Prof. Me. Felipe Carvalho Sampaio.

1. Geração Distribuída. 2. Relé de Sobrecorrente Direcional. 3. Proteção Adaptativa. 4. Inteligência Artificial. 5. Algoritmos de Otimização. I. Título.

CDD 621.3

LUCA MACÊDO MARTINS

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS À
PROTEÇÃO ADAPTATIVA DE RELÉS EM REDES COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

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

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Me. Felipe Carvalho Sampaio (Coorientador)
Casa dos Ventos Energias Renováveis S/A

Prof. Dr. Lucas Silveira Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ao meu pai, Francisco Stênio Martins Gomes da Silva;

À minha mãe, Natasha Rocha Lima de Macêdo Martins;

À minha namorada, Beatriz Rodrigues Neri;

À minha família;

A todos os meus amigos queridos que fizeram parte dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais Stênio e Natasha, minhas inspirações de vida, que sempre apoiaram minha decisão de ingressar no Curso de Engenharia Elétrica e me forneceram muito mais do que o necessário para concluir essa jornada.

À minha namorada Bia, a quem eu sempre recorri nos momentos mais difíceis e sempre fiz questão de compartilhar minhas vitórias. Sua determinação, zelo e paixão pela vida acadêmica me serviram de inspiração durante o decorrer de todo o Curso.

Ao meu Professor Orientador Raimundo Furtado, por toda a disposição, confiança, diligência e sabedoria apresentadas que o tornam certamente o melhor mentor que poderia ter escolhido para o presente estudo.

Ao meu Coorientador Felipe Sampaio, por ter dedicado seu tempo de modo a fornecer grande parte do material, das ferramentas e dos conhecimentos necessários para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de Curso Danto, Aury, Álvaro, Davi, Daniel, Ivo, Vinicius, Luan e João Victor. O companheirismo apresentado, compartilhando vitórias e derrotas, os tornam os melhores parceiros que poderia ter desejado para essa jornada.

A todo o corpo docente do Curso de Engenharia Elétrica da UFC, por todos os conhecimentos técnicos e experiências transmitidas, que já estão sendo de grande contribuição para a minha carreira profissional.

“Não é a força, mas a constância dos bons resultados que conduz os homens à felicidade.”

(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

Diante da tendência mundial de descarbonização, muitos recursos têm sido direcionados à inserção de Geração Distribuída, por meio de fontes alternativas de energia, nos Sistemas Elétricos no Brasil e no Mundo. Entretanto, essa introdução acarreta um considerável aumento da complexidade desses sistemas, em especial no que tange a proteção dos sistemas elétricos, haja vista as recorrentes alterações na direção e na magnitude das correntes de curto-circuito. Portanto, o modo tradicional de parametrização dos relés de proteção se mostrou ineficaz para assegurar a integridade e o bom funcionamento dessas redes. Um dos métodos de contornar essa problemática é por meio da utilização de sistemas de Proteção Adaptativa com Relés de Sobrecorrente Direcional. Tal ideia tem sido cada vez mais explorada na literatura e consiste em, no caso de uma variação na topologia da rede, o sistema de Proteção Adaptativa recebe os novos dados, recalcula os parâmetros dos relés e realiza a mudança de ajustes em tempo real, de modo a garantir a coordenação da proteção. Porém, o processo de redefinição desses parâmetros exige cálculos extensos e complexos, além de, muitas vezes, não apresentar uma solução definitiva. Tendo em vista esse panorama, foi desenvolvido por Sampaio et al. (2022) o algoritmo de otimização *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm*, o qual se utiliza de ferramentas de Inteligência Artificial e cuja finalidade é garantir Proteção Adaptativa a Relés de Sobrecorrente Direcional. Diante disso, o objetivo geral do presente estudo é ampliar a análise da contribuição a essa temática do método de otimização de parâmetros de relés direcionais desenvolvido por Sampaio et al. (2022). Para tal, o presente trabalho se propõe a apresentar uma análise comparativa de métodos de otimização aplicados à Proteção Adaptativa de relés em redes com Geração Distribuída, de modo a aferir o desempenho do método desenvolvido por Sampaio et al. (2022) em relação aos de cinco outros apresentados na literatura por outros autores. Os resultados obtidos sugeriram que, embora exija um dos maiores tempos de processamento, o algoritmo proposto por Sampaio et al. (2022) apresentou melhor desempenho no que diz respeito a retornar consistentemente parâmetros com maior velocidade de atuação dos relés direcionais. Portanto, foi reforçada a contribuição desse algoritmo ao tema da Proteção Adaptativa de Relés de Sobrecorrente Direcional em redes com a presença de Geração Distribuída.

Palavras-chave: Geração Distribuída; Relé de Sobrecorrente Direcional; Proteção Adaptativa; Inteligência Artificial; Algoritmos de Otimização.

ABSTRACT

In the face of the global trend towards decarbonization, significant resources have been directed toward the integration of Distributed Generation through alternative energy sources into electrical systems in Brazil and worldwide. However, this introduction leads to a considerable increase in the complexity of these systems, particularly regarding the protection of electrical systems, given the frequent changes in the direction and magnitude of short-circuit currents. Therefore, the traditional method of parameterizing protection relays has proven ineffective in ensuring the integrity and proper functioning of these networks. One method to address this issue is through the use of Adaptive Protection Systems with Directional Overcurrent Relays. This concept has been increasingly explored in the literature and involves the Adaptive Protection System receiving new data in the event of a change in the network's topology. It recalculates relay parameters and adjusts settings in real-time to ensure protection coordination. However, the process of redefining these parameters requires extensive and complex calculations and often does not provide a definitive solution. In light of this scenario, Sampaio et al. (2022) developed the Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm, an optimization algorithm that utilizes Artificial Intelligence tools. Its purpose is to ensure Adaptive Protection for Directional Overcurrent Relays. The general objective of this study is to expand the analysis of the contribution to this topic by the optimization method developed by Sampaio et al. (2022). To achieve this, the study presents a comparative analysis of optimization methods applied to Adaptive Protection of relays in networks with Distributed Generation. The aim is to assess the performance of the method developed by Sampaio et al. (2022) in comparison to five others presented in the literature by different authors. The results suggest that, despite requiring one of the longest processing times, the algorithm proposed by Sampaio et al. (2022) demonstrated better performance consistently in returning parameters with higher speed of operation for directional relays. Therefore, the contribution of this algorithm to the topic of Adaptive Protection of Directional Overcurrent Relays in networks with Distributed Generation was reinforced.

Keywords: Distributed Generation; Directional Overcurrent Relay; Adaptive Protection; Artificial Intelligence; Optimization Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo Global de Energia.....	17
Figura 2 – Parcela de Solar e Eólica na Geração de Energia Elétrica Global.....	18
Figura 3 – Consumo de Energia no Brasil.....	18
Figura 4 – Parcela de Solar e Eólica na Geração de Energia Elétrica no Brasil.....	18
Figura 5 – Configuração de uma microrrede.....	19
Figura 6 – Estrutura básica de sistema de proteção.....	21
Figura 7 – Diagrama multifilar do relé direcional.....	23
Figura 8 – Curva de operação do tipo Normal Inversa.....	24
Figura 9 – Diagrama Fasorial para condição e quadratura e $\varphi = 45^\circ$ elétricos.....	25
Figura 10 – Jogo da Imitação de Turing.....	27
Figura 11 – Lógica Booleana x Lógica Fuzzy.....	29
Figura 12 – Gráfico Fuzzy para o exemplo trabalhado.....	29
Figura 13 – Processo de Inferência Fuzzy.....	30
Figura 14 – Fuzzificação do peso de iteração I.....	38
Figura 15 – Fuzzificação da diversidade D_i	39
Figura 16 – Fuzzificação da variação de frequência Δf	39
Figura 17 – Fuzzificação da amplitude A_i	40
Figura 18 – Fuzzificação da taxa de emissão de sinais r_i	41
Figura 19 – Fuzzificação do tamanho do vetor de peso de regulação de busca w_f	41
Figura 20 – Fuzzy Tool Box.....	42
Figura 21 – Topologia da rede IEEE de três barras.....	44
Figura 22 – Topologia da rede IEEE de oito barras.....	45
Figura 23 – Gráfico de tempos de atuação para a rede IEEE de três barras.....	48
Figura 23 – Gráfico de tempos de atuação para a rede IEEE de três barras.....	48
Figura 23 – Gráfico de tempos de atuação para a rede IEEE de três barras.....	48
Figura 24 – Gráfico de tempos de atuação para a rede IEEE de oito barras.....	49
Figura 25 – Gráfico do tempo total de atuação para a rede de três barras.....	52
Figura 26 – Gráfico do tempo total de atuação para a rede de oito barras.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de curva de operação de acordo com a norma IEC-60255-3.....	24
Tabela 2 – Regras Fuzzy utilizadas no AFDBA.....	39
Tabela 3 – Relações de Transformação dos TCs da rede IEEE de três barras.....	44
Tabela 4 – Corrente de curto-circuito dos relés principal-backup da rede IEEE de 3 barras...	45
Tabela 5 – Relações de Transformação dos TCs da rede IEEE de oito barras.....	46
Tabela 6 – Corrente de curto-circuito dos relés principal-backup da rede IEEE de 3 barras...	46
Tabela 7 – Valores de TAP e DT retornados à rede IEEE de três barras pelo AFDBA.....	47
Tabela 8 – Valores de TAP e DT retornados à rede IEEE de oito barras pelo AFDBA.....	49
Tabela 9 – Parâmetros Retornados pelos algoritmos para a Rede IEEE de três barras.....	51
Tabela 10 – Tempo Total de Atuação dos relés de cada algoritmo para a rede de três barras...	52
Tabela 11 – Parâmetros Retornados para a Rede IEEE de oito barras.....	53
Tabela 12 – Tempo Total de Atuação dos relés de cada algoritmo para a rede de oito barras..	53
Tabela 13 – Tempo eficaz de cada algoritmo para a rede de três barras.....	55
Tabela 14 – Tempo eficaz normalizado de cada algoritmo para a rede de três barras.....	55
Tabela 15 – Solução, Média e Desvio Padrão de cada algoritmo para a rede de 3 barras.....	56
Tabela 16 – Solução, Média e Desvio Padrão de cada algoritmo para a rede de 8 barras.....	57
Tabela 17 – Parâmetros retornados AFDBA à rede IEEE três barras: Original x Presente estudo.....	58
Tabela 18 – TTAs obtidos pelo AFDBA à rede IEEE 3 barras: Original x Presente estudo.....	58
Tabela 19 – Tempo eficaz normalizado de cada aplicação do AFDBA à rede de 3 barras.....	59
Tabela 20 – Solução, Média e Desvio Padrão de cada versão do AFDBA para a rede de três barras.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GD	Geração Distribuída
IA	Inteligência Artificial
SEP	Sistema Elétrico de Potência
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
GCH	Grande Central Hidrelétrica
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TAP	Corrente de Atuação
DT	Dial de Tempo
PC	<i>Personal Computer</i>
AFDBA	<i>Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm</i>
SA	<i>Seeker Algorithm</i>
BBO-LP	<i>Hybrid Biogeography-Based with Linear Programming</i>
IGWO	<i>Improved Grey Wolf Optimization</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
TSA	<i>Tunicate Swarm Algorithm</i>
BA	<i>Bat Algorithm</i>
DBA	<i>Directional Bat Algorithm</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
RTC	Relação de Transformação do Transformador de Corrente
TTA	Tempo Total de Atuação dos relés
PRODIST	Regras e Procedimentos de Distribuição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	15
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	17
2.1.1	<i>Introdução</i>	17
2.1.2	<i>Microrredes</i>	19
2.2	PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	20
2.2.1	<i>Introdução</i>	20
2.2.2	<i>Impactos da Geração Distribuída na Proteção do SEP</i>	22
2.2.3	<i>Relé de Sobrecorrente Direcional</i>	23
2.2.4	<i>Proteção adaptativa</i>	26
2.3	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	27
2.3.1	<i>Introdução</i>	27
2.3.2	<i>Lógica Fuzzy</i>	29
2.3.3	<i>Algoritmos de Otimização</i>	33
2.4	ESTADO DA ARTE.....	34
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	ALGORITMO DESENVOLVIDO POR SAMPAIO ET AL. (2022) - AFDBA	36
3.1.1	<i>Algoritmos de base</i>	36
3.1.2	<i>Algoritmo de estudo</i>	39
3.2	IMPLEMENTAÇÃO DO AFDBA.....	44
3.2.1	<i>Software MATLAB</i>	44
3.2.2	<i>AFDBA aplicado à Proteção Adaptativa</i>	45
3.3	ESTUDOS DE CASO	46
3.3.1	<i>Rede IEEE de três Barras</i>	46
3.3.2	<i>Rede IEEE de oito Barras</i>	47
3.4	APURAÇÃO DA APLICABILIDADE DOS PARÂMETROS RETORNADOS.....	49

3.4.1	<i>Primeiro estudo de caso</i>	49
3.4.2	<i>Segundo estudo de caso</i>	50
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
4	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	53
4.1	VELOCIDADE DE ATUAÇÃO	53
4.2	ESFORÇO COMPUTACIONAL	57
4.3	ROBUSTEZ	59
4.4	AFDBA: IMPLEMENTAÇÃO ORIGINAL X PRESENTE ESTUDO	60
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5	CONCLUSÃO	63

1 INTRODUÇÃO

No contexto geopolítico hodierno, muitos esforços têm sido feitos no âmbito de mitigar a emissão de carbono na atmosfera. Nesse panorama, uma das principais consequências é a busca por desenvolvimento e integração de fontes renováveis de energia (USAMA et al., 2021). A geração de energia elétrica por intermédio dessas fontes alternativas em redes elétricas é denominada Geração Distribuída (GD).

E, embora a inserção de GD traga vários benefícios para a rede, como a redução de perdas, aumento de confiabilidade e de estabilidade, entre outros (CAI et al., 2022), a natureza estocástica das faltas e as novas topologias de rede que esse fenômeno traz consigo dificultam bastante a proteção do sistema elétrico (ZAROOUR et al., 2023), i.e., métodos tradicionais de parametrização de relés de proteção são pouco eficazes em redes as quais contam com a presença de GD.

Tendo em vista essa problemática, uma solução bastante estudada é a Proteção Adaptativa. Esse conceito consiste na capacidade de reajustar automaticamente os parâmetros dos relés de acordo com as novas condições de operação da rede (SAMPAIO et al., 2023). Além disso, é conveniente ressaltar que, para recalcular os ajustes de proteção, são utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial (IA), visto que elas são muito eficazes em problemas de otimização. Acresça-se, ainda, que, nessas novas topologias de rede com várias fontes de geração, uma maneira bastante eficaz de isolar apenas a zona onde ocorreu a falta, é a implementação de Relés de Sobrecorrente Direcional, os quais atuam em correntes de curto-circuito fluindo apenas em uma direção pré-definida (MARTIN et al., 2023).

Nesse contexto, foi desenvolvido em (SAMPAIO et al., 2022), um método de garantir a proteção adaptativa em redes com GD, por meio da elaboração de um algoritmo de otimização denominado *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm*. Essa ferramenta faz uso dos conceitos de inteligência artificial: Algoritmos Evolutivos e Lógica *Fuzzy*, para retornar parâmetros de relés direcionais.

Entretanto, cinco outros algoritmos, também utilizados na coordenação de relés direcionais em redes com GD, destacam-se na literatura e incitam a elaboração de uma análise comparativa entre eles e o proposto em (SAMPAIO et al., 2022). Esses algoritmos são: *Seeker Algorithm* (AMRAEE, 2012), *New Hybrid Biogeography-Based with Linear Programming* (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015), *Improved Grey Wolf Optimization* (ZAIHAH JAMAL et al., 2018), *New Mixed Integer Linear Programming* (SRINIVAS; SHANTI SWARUP, 2019), e *Tunicate Swarm Algorithm* (ABDELHAMID et al., 2022).

Com base nesse panorama, o presente estudo procura expandir a análise do aporte do algoritmo proposto por Sampaio et al. (2022) no que se refere ao tema da Proteção Adaptativa com relés direcionais em redes com GD. Para tal, é proposta uma análise comparativa entre o desempenho do *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm* em relação aos de cinco algoritmos apresentados na literatura por outros autores.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral ampliar a análise da contribuição do método de otimização de parâmetros de relés direcionais proposto por Sampaio et al. (2022), no que diz respeito à Proteção Adaptativa de Redes com Geração Distribuída.

1.1.2 Objetivos específicos

Ademais, o presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Compreender os impactos da inserção da Geração Distribuída em redes de distribuição, no que diz respeito aos sistemas de proteção;
- Explicar os principais conceitos e ferramentas referentes à Inteligência Artificial, bem como sua implementação em algoritmos de otimização;
- Apresentar métodos de otimização presentes na literatura, explicitando suas particularidades;
- Implementar o método de otimização de parâmetros de relés direcionais desenvolvido por Sampaio et al. (2022);
- Definir e aplicar meios de comparar o desempenho do método de otimização utilizado em relação aos de cinco algoritmos apresentados na literatura por outros autores;
- Apresentar os resultados da análise comparativa do algoritmo proposto em Sampaio et al. (2022) com os demais.

1.2 Estrutura do Trabalho

Primeiramente, no Capítulo 2 é traçada a fundamentação teórica, com os seguintes tópicos: Geração Distribuída, Proteção do Sistema Elétrico de Potência, Impactos da GD na Proteção do SEP, Relé de Sobrecorrente Direcional, Proteção Adaptativa, Inteligência Artificial, Lógica *Fuzzy*, Algoritmos de Otimização, além de apresentar uma breve relação de estudos correlatos.

Em seguida, no Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada na pesquisa, exibindo as ideias do código utilizado, o software no qual o algoritmo é implementado e as redes selecionadas para os estudos de caso.

Posteriormente, no Capítulo 4 são apresentados os resultados e realizada a análise comparativa entre o desempenho do método de otimização proposto por Sampaio et al. (2022) e os de cinco outros algoritmos apresentados na literatura.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do presente estudo, além de exibir sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

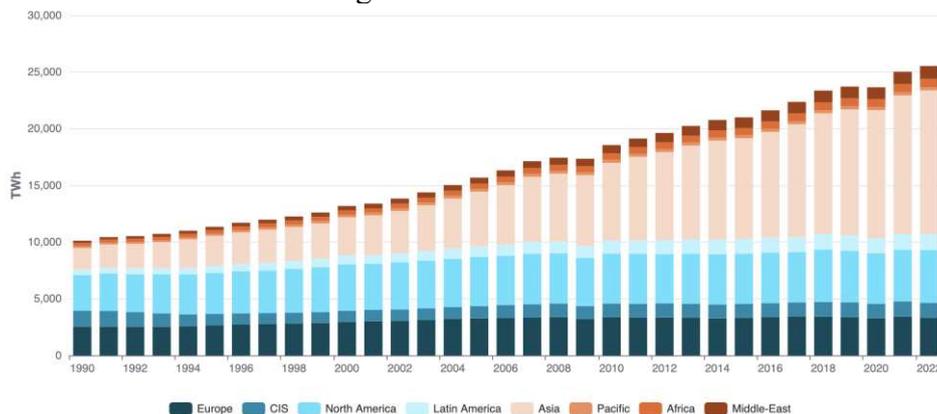
Neste capítulo, será apresentada a base teórica utilizada nesse trabalho, a qual engloba os conceitos de Geração Distribuída, Proteção do Sistema Elétrico de Potência (SEP), Impactos da Geração distribuída na Proteção do SEP, Relés de Sobrecorrente Direcional, Proteção Adaptativa, Inteligência Artificial, Lógica *Fuzzy* e Algoritmos de Otimização. Ademais, será feita uma breve investigação a respeito do Estado da Arte de Algoritmos Inteligentes aplicados à parametrização de relés de sobrecorrente direcional em redes com a presença de GD. Por fim, serão constatadas as considerações finais no tocante à fundamentação teórica.

2.1 Geração Distribuída

2.1.1 Introdução

A crescente necessidade de consumo de energia é uma realidade presente em praticamente todo o mundo. A demanda global por energia apresentou um aumento de 2,0% em 2022 (superior ao aumento percentual médio visto no período de 2010-2019, de 1,6%), conforme mostrado na Figura 1.

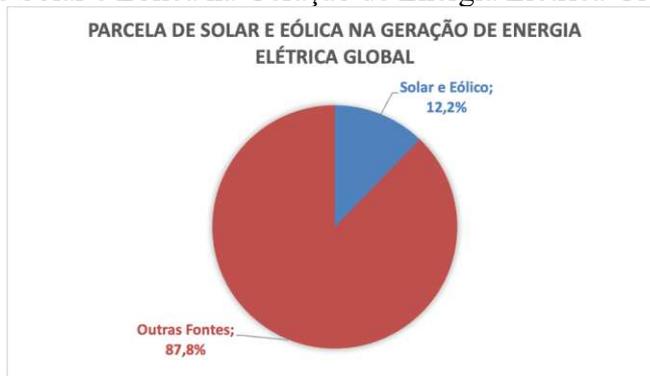
Figura 1 – Consumo Global de Energia.



Fonte: (ENERDATA, 2023).

Tendo em vista esse aumento e a grande busca pela descarbonização, percebe-se o crescimento da inserção de geração de energia por meio de Fontes Alternativas de Energia. Nesse contexto, destacam-se as fontes Solar e Eólica, as quais juntas já correspondiam a 12,2% da produção mundial ao fim do ano de 2022. Essa contribuição é representada na Figura 2.

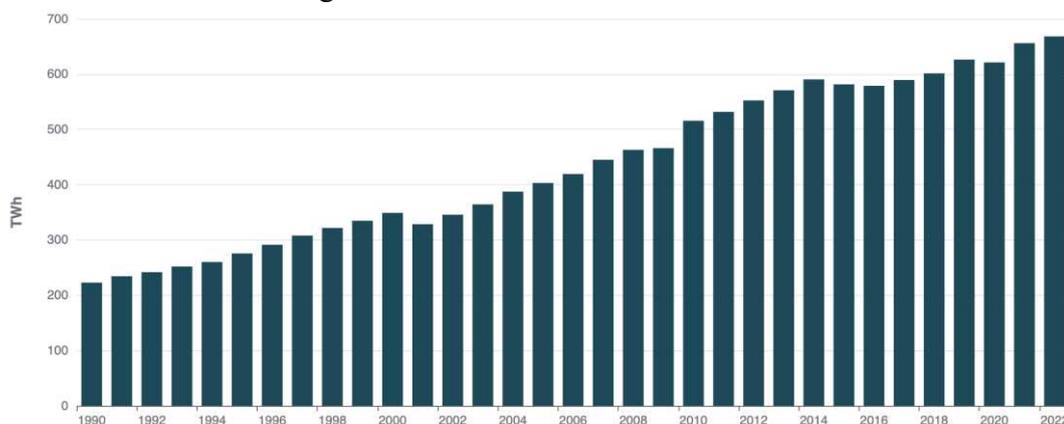
Figura 2 – Parcela de Solar e Eólica na Geração de Energia Elétrica Global.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de (ENERDATA, 2023).

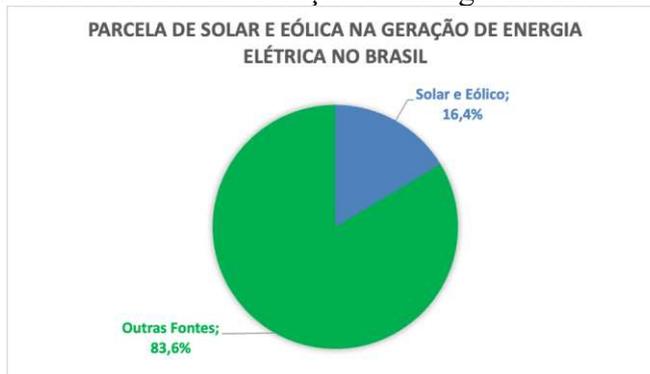
No tocante à realidade brasileira, o aumento de demanda de energia em 2022 foi de 1,1%, já a participação das fontes Solar e Eólica corresponderam a 16,4% da energia produzida no País, conforme retratado nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 – Consumo de Energia no Brasil.



Fonte: (ENERDATA, 2023).

Figura 4 – Parcela de Solar e Eólica na Geração de Energia Elétrica no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de (ENERDATA, 2023)

Essa geração por meio de fontes alternativas é tipicamente incorporada às redes de distribuição, ocasionando a Descentralização do Sistema Energético. A essas formas alternativas de se gerar energia é designado o termo **Geração Distribuída**. Como mostrado nas Figuras 3 e 4, ela já representa, tanto para o Brasil como para o Mundo, parcela expressiva da produção de energia elétrica. Tal panorama fomenta a elaboração de diversos estudos no âmbito de aprimorar a interconexão de GD às redes de distribuição, abordando temas como controle, proteção, qualidade de energia, entre outros (HATZIARGYRIOU, 2014, p. 3).

2.1.2 Microrredes

Além disso, uma definição bastante importante no tocante à GD é o de microrredes, o qual pode ser definido como sistemas de distribuição com GD em conjunto com dispositivos de armazenamento e cargas flexíveis, cuja configuração é apresentada na Figura 5. Acresça-se, ainda, que esse tipo de sistema pode atuar de modo ilhado ou normal, sendo o primeiro referente ao caso em que a microrrede está desconectada da rede de distribuição principal, já no segundo há essa conexão (HATZIARGYRIOU, 2014, p. 4).

Figura 5 – Configuração de uma microrrede.



Fonte: (HATZIARGYRIOU, 2014, p. 5)

Por fim, é interessante ressaltar que, embora as fontes de energia eólica e solar sejam as mais relevantes no que diz respeito aos conceitos de GD e microrredes, há outras fontes alternativas de energia utilizadas no mesmo intuito. Dentre elas, cabe citar as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), as quais são caracterizadas por usinas hidrelétricas com potência instalada entre 5 e 50MW, e as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs), as quais devem possuir potência instalada entre 0 e 5MW. No contexto brasileiro, quando somadas, essas duas formas de GD representam aproximadamente 3,5% de toda a potência instalada no País (ABRAPCH, 2023).

2.2 Proteção do Sistema Elétrico de Potência

2.2.1 Introdução

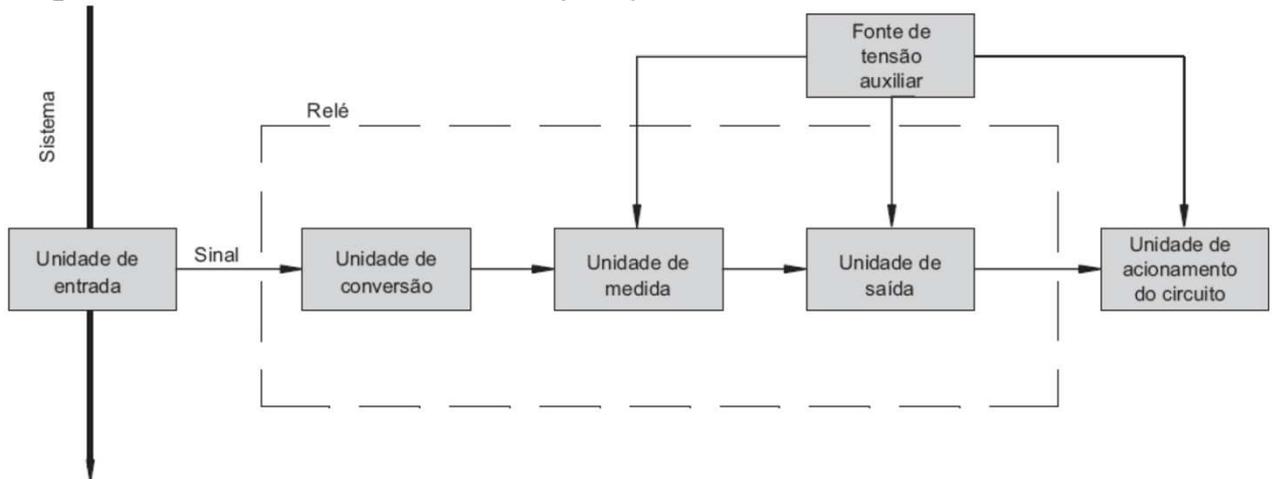
O SEP compreende toda as estruturas da rede elétrica, desde a geração até o ponto de entrega ao consumidor, e, dentre todos os desafios existentes para assegurar o seu bom funcionamento, talvez o de maior relevância seja a garantia de proteção contra falhas no sistema (como curtos-circuitos, sobrecargas, sub e sobretensão, entre outros).

Esses fenômenos são inerentes ao funcionamento do SEP e, caso não haja um sistema de proteção confiável, as consequências podem ser desastrosas. Os principais componentes desses sistemas são os relés, os quais são dispositivos inteligentes capazes de identificar fenômenos como elevação de corrente, elevação e redução de tensão, inversão do sentido da corrente, alteração da impedância do sistema, entre outros. A estes dispositivos sempre devem ser incorporados equipamentos capazes de separar fisicamente o sistema elétrico: disjuntores ou religadores (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022, p. 2).

No que diz respeito à estrutura de um sistema de proteção, a mesma pode ser subdividida em seis unidades básicas: Unidade de Entrada (representada pelos dispositivos que recebem e convertem os dados da rede, como Transformadores de Corrente – TCs – e Transformadores de Potencial – TPs), Unidade de Conversão de Sinal (representada pela parte interna ao relé que recebe os sinais dos TCs e TPs e os converte em sinais digitais adequados ao relé), Unidade de Medida (representada pelos dispositivos responsáveis pela comparação entre os dados obtidos pela Unidade de Conversão e os valores previamente parametrizados no relé), Unidade de Saída (representada normalmente por uma chave semicondutora, responsável pela comunicação com a Unidade de Acionamento), Unidade de Acionamento (representada pela bobina que deve ser montada no corpo do disjuntor ou religador, responsável pelo acionamento da desconexão do sistema) e Fonte de Tensão Auxiliar (representada pelos equipamentos, normalmente baterias, responsáveis pelo fornecimento de energia às unidades de medida, saída e acionamento).

No intuito de visualizar melhor o funcionamento desse tipo de sistema, de modo a compreender como as unidades básicas se comunicam, pode-se recorrer ao fluxograma apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura básica de sistema de proteção.



Fonte: (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022, p. 2)

Outrossim, é fundamental para o bom funcionamento de um sistema de proteção que ele possua as seguintes características: Seletividade (conceito que define que a unidade mais próxima da falha deverá atuar, fazendo que seja desconectada a menor porção possível do SEP), Coordenação (conceito que estabelece margens – normalmente de 0,2 a 0,5s – entre os tempos de atuação dos relés de determinada rede, no intuito de garantir a Seletividade), Zonas de atuação (conceito que afirma que o relé deve ser capaz de identificar se a falha está interno ou externo a sua área de atuação), Velocidade (capacidade do relé de atuar, na ocorrência de uma falta, no mínimo tempo possível), Sensibilidade (capacidade do relé de definir com precisão se um valor está dentro ou não da sua faixa de operação) e Confiabilidade (é a garantia que o relé irá operar de acordo com o modo que foi parametrizado). (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022, p. 6)

Ademais, dois conceitos (consequentes dos conceitos de seletividade, coordenação e zonas de atuação) de suma importância no que se refere à proteção dos sistemas elétricos são os de relé primário e relé de back-up. O primeiro diz respeito ao relé mais próximo de uma falta em sua zona de atuação, devendo atuar em um tempo definido de modo a desligar a área afetada. Já o segundo se refere a outro relé, cuja zona de atuação também engloba a região da falta, e que, caso o relé primário falhe, deverá atuar em um tempo que respeite à margem de coordenação.

Além disso, é primordial para a compreensão do funcionamento dos relés entender o que são as Funções de Proteção. Elas são consequência do fato de que cada relé é fabricado para atuar somente em determinados tipos de ocorrências, i.e., caso um dispositivo tenha sido desenvolvido ou programado para atuar apenas em casos de sobrecorrente, ele não irá atuar em

casos de sub ou sobretensão, por exemplo. Tendo isso em vista, foi desenvolvida uma tabela pelo *American National Standards Institute*, a qual define e atribui códigos numéricos (Código ANSI) às mais diversas funções de proteção (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022, p. 8). Para o presente estudo, é conveniente ressaltar as funções de proteção 50/50N (relé de sobrecorrente instantâneo de fase e de neutro), 51/51N (relé de sobrecorrente temporizado de fase e de neutro) e 67/67N (relé de sobrecorrente direcional de fase e de neutro).

2.2.2 Impactos da Geração Distribuída na Proteção do SEP

Embora a inserção de GD nas redes de distribuição tragam consigo diversos benefícios, tais como o retorno econômico, a descarbonização, a redução de perdas, aumento de confiabilidade e de estabilidade, entre outros (CAI et al., 2022), ela é acompanhada de alterações frequentes na topologia da rede (devido à natureza estocástica das fontes alternativas de energia) e fluxos bidirecionais. Esses fenômenos ocasionam modificações na direção e na magnitude de curto-circuito da rede (BARRANCO-CARLOS et al., 2023).

Ademais, como visto no tópico 2.1.2, microrredes podem atuar nos modos normal e ilhado. Quando ocorre uma falta e a rede está operando em modo normal, tanto a rede externa como a GD contribuem para a corrente de curto-circuito. Já quando ocorre uma falta e a rede está operando em modo ilhado, apenas a GD contribui para a corrente de curto-circuito (NAVEEN; JENA, 2021).

Acresça-se, ainda, que as redes de distribuição, as quais iniciaram sua implementação há mais de um século, não foram originalmente projetadas para operarem com a inserção de GD ou microrredes em modo ilhado (WONG et al., 2022). Nesse panorama, os métodos padrões de parametrização de relés (nos quais esses dispositivos são configurados previamente, com parâmetros fixos, de acordo com a configuração da topologia da rede) são insuficientes para garantir o bom funcionamento do sistema de proteção. Portanto, para essas redes são necessários esquemas de proteção que levem em consideração o fluxo bidirecional de corrente, as frequentes alterações na topologia da rede, entre outros aspectos inerentes à integração de GD (BARRANCO-CARLOS et al., 2023).

Dentre as alternativas utilizadas para contornar esse problema, uma das que mais tem sido objeto de estudo é a implementação de Proteção Adaptativa utilizando Relés Direcionais de Sobrecorrente, como será visto nos próximos tópicos desse capítulo.

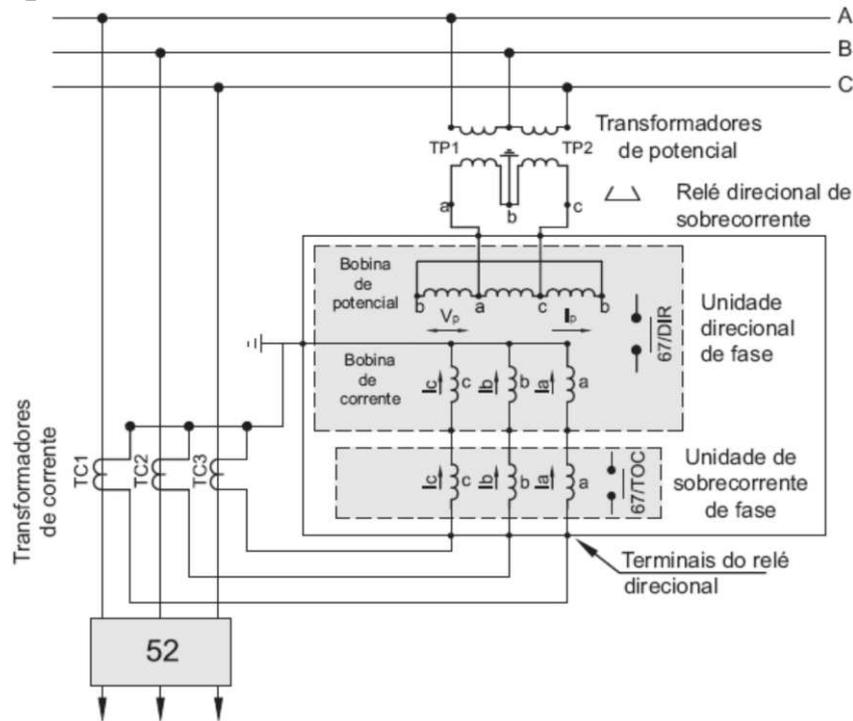
2.2.3 Relé de Sobrecorrente Direcional

As funções de proteção padrão de um relé são a de sobrecorrente instantânea (50/50N) e a de sobrecorrente temporizada (51/51N), uma vez que elas garantem proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos a redes de topologia radial, nas quais o fluxo é exclusivamente no sentido da geração ao consumidor. Todavia, em redes em topologia de anel ou com a presença de GD essas funções não são suficientes para garantir a seletividade do sistema de proteção.

Tendo isso em vista, uma das formas de contornar essa problemática é por meio da implementação de relés de sobrecorrente direcional (67/67N). Eles possuem características semelhantes aos de sobrecorrente temporizada, porém acrescido do fato de que eles somente são sensíveis a sobrecargas e curtos-circuitos em um sentido pré-definido. Devido a essa peculiaridade, a utilização desse dispositivo permite representar redes com topologia em anel ou com a presença de GD em dois sistemas radiais em sentidos opostos (KINDERMANN, 2005, p. 178).

Essa sensibilidade à direção da corrente de falta é possível por meio da comparação fasorial de duas grandezas: tensão de polarização e corrente de operação. No intuito de compreender um pouco melhor esse processo, é preciso estar ciente que o relé possui interno a si duas unidades operacionais, a Unidade de Sobrecorrente Temporizada (constituída por uma bobina de corrente, a qual irá induzir um fechamento de contato uma vez que a corrente de acionamento pré-definida for atingida por um tempo definido) e a Unidade Direcional (constituída por duas bobinas, uma de corrente e uma de tensão, as quais tornam possível a comparação fasorial mencionada anteriormente). Tais componentes operacionais são representados no diagrama multifilar da Figura 7.

Figura 7 – Diagrama multifilar do relé direcional.



Fonte: (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022, p. 172)

A modelagem matemática da unidade de sobrecorrente temporizada do relé direcional é, como o próprio nome da diz, semelhante à do relé de sobrecorrente temporizado (51/51N), na qual o tempo é definido de acordo com a equação (1).

$$t = \frac{\beta}{(M)^\alpha - 1} * DT \quad (1)$$

Na qual t é o tempo de atuação, M é o múltiplo (definido pela razão $\frac{I_{cc}}{I_{pk}}$, onde I_{cc} é a corrente de curto-circuito e I_{pk} é a corrente de acionamento do relé – ou corrente de *pick-up*), DT é o dial de tempo (constante de multiplicação definida pelo projetista) e as constantes α e β são definidas pelo tipo de curva escolhida, conforme a Tabela 1.

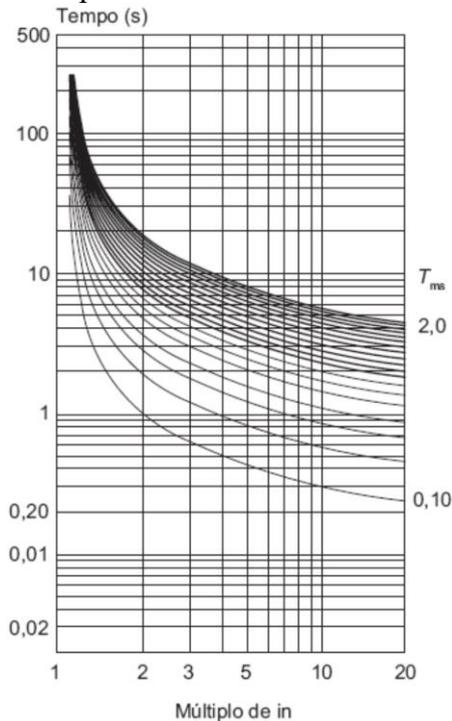
Tabela 1 – Tipos de curva de operação de acordo com a norma IEC-60255-3.

Tipo de Curva	α	β
Normal Inversa (NI)	0,02	0,14
Muito Inversa (MI)	1	13,5
Extremamente inversa (EI)	2	80

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o presente estudo, a curva utilizada é a Normal Inversa (conforme será apresentado no Capítulo 3), cujo comportamento é exibido na Figura 8.

Figura 8 – Curva de operação do tipo Normal Inversa.



Fonte: (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022, p. 110)

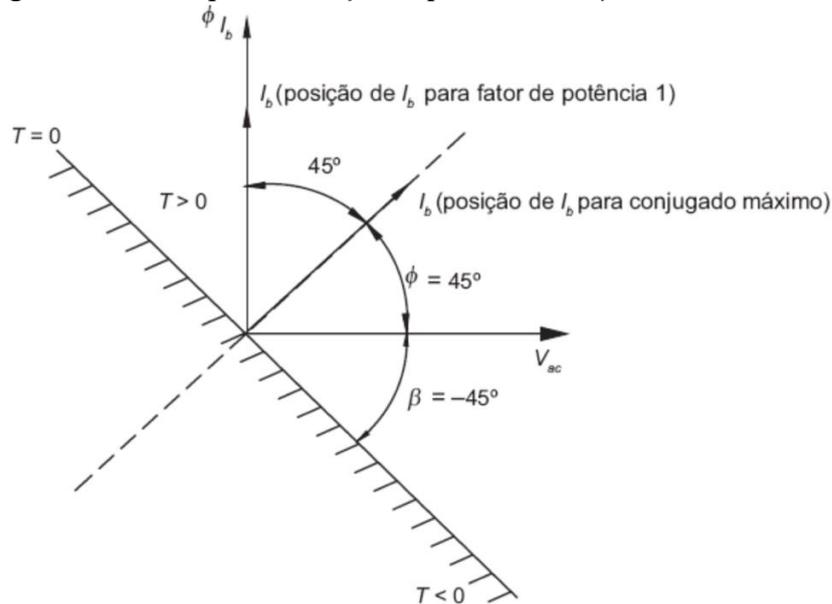
Já a modelagem matemática da unidade direcional gira em torno do torque gerado pela interação entre a tensão de polarização e a corrente de operação que circulam nas bobinas de tensão da e corrente, respectivamente. Esse fenômeno pode ser descrito pela equação (2) (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022, p. 170).

$$T = K \times V_{bt} \times I_{bc} \times \cos(\varphi - \theta) \quad (2)$$

Na qual T é o torque, K é a constante de multiplicação, V_{bt} é a tensão de polarização, I_{bc} é a corrente de operação, φ é o ângulo de máximo toque e θ é o ângulo de defasagem entre V_{bt} e a corrente de carga.

Ademais, Analisando a Figura 9, percebe-se que, traçando a reta normal à posição da corrente de carga para o torque máximo, obtêm-se a reta onde o torque do relé é nulo, a qual define o limiar de operação do relé, i.e., definindo as áreas de atuação ($T < 0$) e não-atuação ($T > 0$). Portanto, caso haja uma corrente de falta que passe por um relé direcional, o mesmo só irá solicitar a abertura do disjuntor associado a ele caso ela esteja na sua zona de operação.

Figura 9 – Diagrama Fasorial para condição e quadratura e $\varphi = 45^\circ$ elétricos.



Fonte: (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022, p. 178)

Para este estudo, será utilizada a conexão quadratura, na qual tensão de polarização (V_{bt}) é normal à corrente de operação (I_{bc}), além de considerar que o ângulo de torque máximo (φ) é de 45° elétricos, pois essas são as condições mais utilizadas na prática.

2.2.4 Proteção adaptativa

Como foi visto no tópico 2.2.3, uma das maneiras de contornar a questão do fluxo bidirecional em redes com a presença de GD é por meio da utilização de relés de sobrecorrente direcionais. Todavia, essa implementação por si só não é suficiente para lidar com a problemática das frequentes alterações na topologia da rede, ocasionadas pela natureza estocástica das fontes alternativas de energia. Tendo isso em vista, uma das possíveis soluções para essa condição é a implementação do conceito conhecido por Proteção Adaptativa.

Essa ideia consiste em um sistema de proteção o qual seja capaz de se auto adaptar, no caso da ocorrência de mudanças na topologia da rede, por meio da utilização de algoritmos inteligentes, os quais recebem e processam os novos dados da rede e retornam os parâmetros necessários à nova coordenação dos relés (GUTIERREZ-ROJAS et al., 2020).

Tal capacidade de reajustar automaticamente os parâmetros dos relés a quantidade de vezes que for necessário confere a esse tipo de esquema de proteção uma flexibilidade muito grande (ABDELHAMID et al., 2022), podendo lidar apropriadamente com alterações como a magnitude e direção das correntes de curto-circuito, as quais, caso ocorressem redes com

esquemas de proteção tradicionais, necessitariam de um novo estudo de proteção, o que aumenta o custo e a mão-de-obra envolvida.

Por fim, é importante ressaltar que a proteção adaptativa combinada à utilização de relés de sobrecorrente direcional tem sido bastante explorada na literatura (como será mostrado no tópico 2.4), e é a base da construção de todos os algoritmos que serão explorados no presente estudo.

2.3 Inteligência Artificial

2.3.1 Introdução

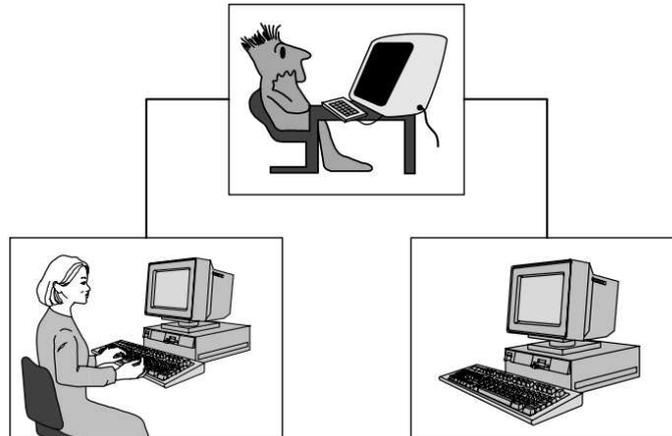
Com a invenção do computador, especialmente após a grande difusão dos *Personal Computers* (PCs), uma das grandes questões que foram levantadas no século passado (embora seja questão de debate até os dias atuais) é se as máquinas podem ser desenvolvidas ao ponto de se tornarem inteligentes (NEGNEVITSKY, 2005, p. 17). Tal indagação fomentou a elaboração de inúmeros estudos e artigos científicos, além do surgimento de um ramo da ciência denominado Inteligência Artificial, o qual tem gradativamente se tornado essencial na contemporaneidade.

Hodiernamente, é notória a grande contribuição desse ramo nas mais diversas áreas, como a medicina, entretenimento, mercado, transporte, entre outras. Porém, até chegar ao nível tecnológico atual, foi necessário um caminho árduo e longo, com períodos de euforias e desilusões acerca dessa ferramenta. Dentre esses momentos emblemáticos, um que representa bem a enorme evolução das máquinas é o caso do *Deep Blue*, computador que derrotou o Grande Mestre de xadrez Garry Kasparov, se tornando a primeira máquina a derrotar um campeão mundial em uma partida de xadrez, em 1996.

Outro momento histórico relevante para a evolução da Inteligência Artificial é a introdução, pelo cientista da computação Alan Turing, do conceito de inteligência de máquina. Tal ideia foi construída por meio da elaboração de um jogo hipotético chamado Jogo da Imitação de Turing. Esse experimento, apresentado na Figura 10, consiste em um humano isolado se comunicando, por meio de um computador, a outros dois usuários em dois outros computadores, sendo um deles operado por outro humano e o outro pela própria máquina, cujo objetivo principal é se passar por um ser-humano (portanto deverá apresentar falhas e vícios de comunicação, tempos de digitação, e outras características inerente ao ser-humano). Ao final do jogo, o humano isolado deverá distinguir qual dos dois usuários é operado pela própria

máquina e, caso ele erre a escolha, a máquina terá vencido o jogo, se confirmando como uma máquina inteligente, i.e., ela terá provado que atingiu uma performance similar a de um ser humano em tarefas cognitivas (NEGNEVITSKY, 2005, p. 2).

Figura 10 – Jogo da Imitação de *Turing*.



Fonte: (NEGNEVITSKY, 2005, p. 3)

Embora a previsão de *Alan Turing*, na qual afirmou que até o ano 2000 já haveriam máquinas capazes de passar pelo teste do jogo elaborado por ele, tenha sido um pouco otimista, no ano de 2023 já existem ferramentas de Inteligência Artificial desenvolvidas as quais são capazes de cumprir essa tarefa com êxito.

Por fim, é importante destacar três conceitos fundamentais da Inteligência Artificial: Sistemas Especialistas, Lógica Difusa e Algoritmos Evolutivos. O primeiro faz uso do conhecimento de humanos especialistas em determinada área na forma de regras específicas (é ideal para problemas os quais possuem domínios reduzidos e bem-definidos). Já o segundo se utiliza de palavras muito utilizadas por especialistas, como raramente, às vezes, frequentemente, entre outras, e atribui a elas um peso que represente o significado dessas palavras (esse conceito será abordado de forma mais detalhada no próximo tópico). Ademais, o terceiro é inspirado na Teoria da Evolução de Darwin, em que, ao longo de várias gerações, os indivíduos mais aptos sobrevivem, aprendem novas regras e repassam aos seus descendentes, gerando assim uma população de espécimes altamente adaptados ao ambiente que vivem. Acresça-se, ainda, que esses três braços da Inteligência Artificial não caminham de forma independente e a combinação deles aprimora a velocidade, adaptabilidade, a tolerância a falhas de sistemas inteligentes (NEGNEVITSKY, 2005, p. 21)

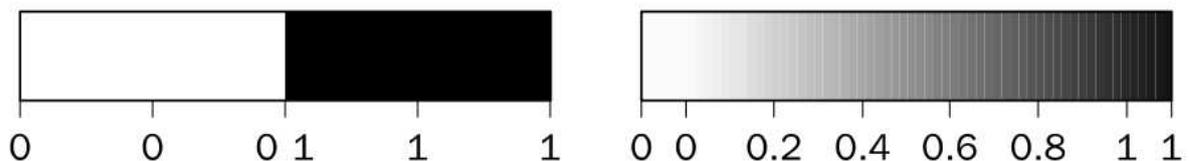
2.3.2 *Lógica Fuzzy*

Como foi dito no tópico anterior, um dos principais conceitos da Inteligência Artificial é o de *Lógica Fuzzy* (termo que, traduzido do inglês, significa difuso ou vago). No entanto, é importante salientar que essa ferramenta não é um tipo de lógica a qual é vaga ou difusa (como a tradução literal sugere), mas um artifício utilizado para representar, com logicidade, aquilo que é difuso ou vago (NEGNEVITSKY, 2005, p. 87).

Para compreender o surgimento e a necessidade da utilização desse artifício, é necessário levar em consideração uma limitação presente na *Lógica Booleana*, na qual uma afirmação só pode ser verdadeira (valor lógico 1) ou falsa (valor lógico 0). Tal deficiência reside no fato de que há certas situações nas quais não se é possível traçar uma linha para definir o que é verdadeiro ou falso. A título de exemplo, considere-se um algoritmo que se utiliza da *Lógica Booleana* e cuja função principal é definir se determinado objeto é leve ou pesado. Para isso, foi definido que objetos os quais possuem massa igual ou superior a 20kg seriam considerados pesados. Entretanto, seguindo esse raciocínio, seria correto afirmar que um objeto “A” de massa 19,95 kg seria não pesado, enquanto um objeto “B” de 20,05 kg seria pesado, embora a diferença de massa entre eles seja de menos de 1%.

De modo a contornar esse contratempo, pode ser implementada *Lógica Fuzzy* a esse tipo de situação, uma vez que essa ferramenta atribui o grau de pertinência de determinada variável a determinado grupo, normalmente representado por um número entre 0 e 1, onde 1 seria o grau de total pertinência e 0 o de nenhum, conforme retratado na Figura 11. Tomando como exemplo o mesmo caso citado anteriormente, estabelecendo grau 0 a objetos de massa igual ou inferior a 5 kg e grau 1 a objetos de massa igual ou superior a 25 kg (e considerando graduação linear), o objeto “A” pertenceria ao grupo de objetos pesados com grau de pertinência 0,725, já o “B” com 0,775 (garantindo, assim, ao código uma coerência bem maior quando comparado ao caso com *Lógica Booleana*).

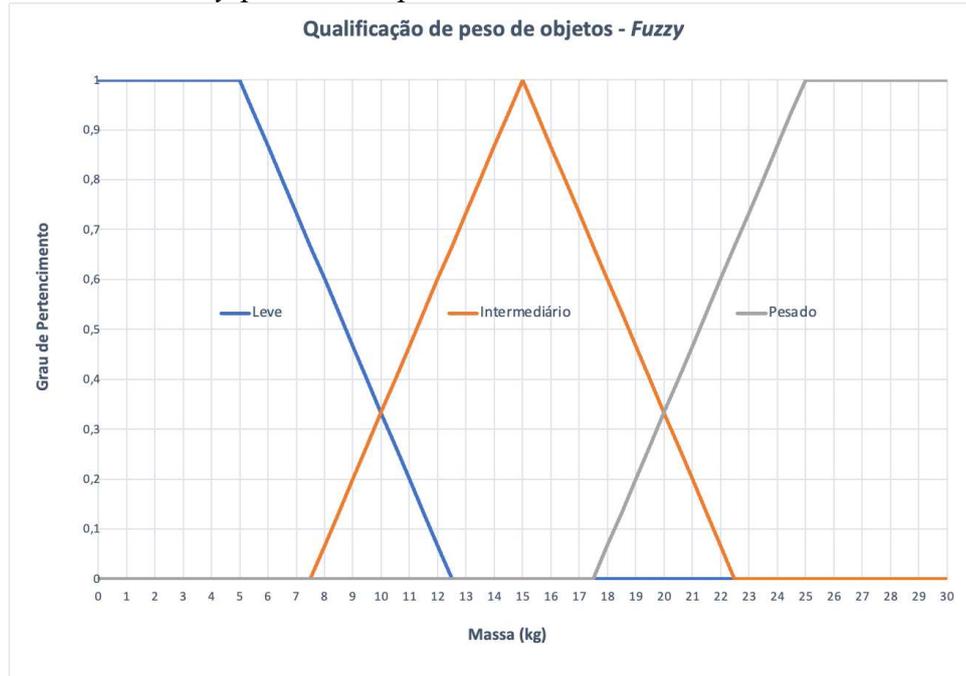
Figura 11 – *Lógica Booleana* x *Lógica Fuzzy*.



Fonte: (NEGNEVITSKY, 2005, p. 89)

Ademais, é interessante salientar que uma variável pode pertencer a mais de um grupo *Fuzzy* ao mesmo tempo. Para ilustrar melhor essa afirmação, será elaborado ainda mais o exemplo do algoritmo classificador de objetos de acordo com seu peso, dividindo-o em três grupos: objetos Leves, objetos Intermediários e objetos Pesados, cujas divisões podem ser vistas no gráfico da Figura 12.

Figura 12 – Gráfico *Fuzzy* para o exemplo trabalhado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Deste modo, percebe-se que, para um objeto de 9 kg é atribuído o grau de pertinência de 0,2 em relação ao grupo dos objetos intermediários e o grau de aproximadamente 0,45 em relação ao grupo dos objetos leves. Do mesmo modo, para um objeto de 19 kg é atribuído o grau de pertinência de aproximadamente 0,45 em relação ao grupo dos objetos intermediários e o grau de 0,2 em relação ao grupo dos objetos pesados.

Além disso, para compreender como a Lógica *Fuzzy* é aplicada computacionalmente em problemas práticos, é necessário conhecer os procedimentos de um Sistema de Inferência *Fuzzy*.

Primeiramente, é realizada a *Fuzzificação*, processo no qual são atribuídos graus de pertinência às variáveis de entrada em relação aos grupos estudados. Esse procedimento é realizado conforme o que foi apresentado no exemplo da qualificação de objetos citado anteriormente, em que foi construído um gráfico para a definição dos grupos *Fuzzy* e, em seguida, definidos os graus de pertinência dos objetos de entrada a cada um dos grupos.

Seguidamente, são aplicadas regras de causa e consequência (regras *Fuzzy*) as quais correlacionam as variáveis de entrada e saída e seus respectivos grupos *Fuzzy*, por meio das operações lógicas “E” e “OU”. A título de exemplo, considera-se um Sistema de Inferência *Fuzzy* destinado a avaliar a condição de estradas. Para esse caso, uma regra *Fuzzy* que poderia ser adotada é: *SE O ASFALTO É ESBURACADO E A ILUMINAÇÃO É FRACA, ENTÃO A ESTRADA É PERIGOSA*. A aplicação desse tipo de regra gera como produto grupos *Fuzzy* intermediários.

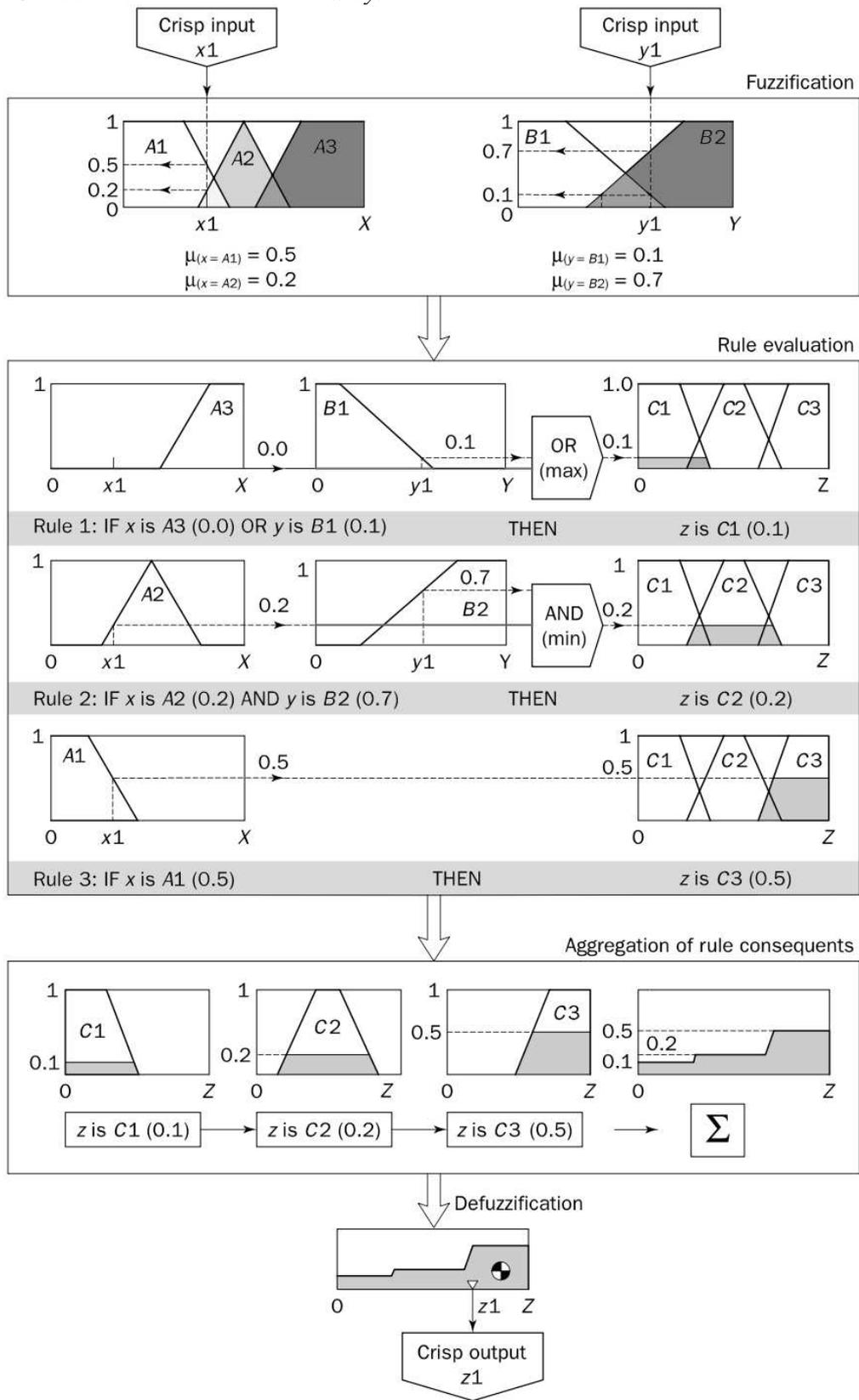
Posteriormente, é realizada, para cada variável de saída, a agregação de todos os grupos *Fuzzy* gerados pelas regras aplicadas, de modo a gerar um único grupo *Fuzzy*, o qual resume todas as relações de causa e consequência. Esse procedimento é feito de tal modo que, se for determinado por uma regra *Fuzzy* que a saída Y é G1, e por outra regra que Y é G2, a agregação geraria o grupo *Fuzzy* consequente do somatório dos grupos G1 e G2.

Ademais, embora o Sistema de Inferência *Fuzzy* gere diversos grupos de modo a representar o comportamento das saídas, é necessário, para aplicações práticas, que cada saída desse procedimento seja um número. Para gerar esses valores numéricos os quais são capazes de representar os grupos *Fuzzy* de saída, é realizado um processo denominado *Defuzzyficação*. Talvez a mais popular dentre as diversas maneiras de realizar esse procedimento seja a do cálculo do centroide do gráfico gerado, o qual consiste em obter o ponto no qual, caso seja traçada uma reta vertical, o gráfico será dividido em duas partes de áreas iguais. Deste modo, uma vez obtido o valor desse ponto, ele é atribuído a sua respectiva variável de saída (NEGNEVITSKY, 2005, p. 111).

Outrossim, uma vez explanadas todas as fases do procedimento de aplicação da Lógica *Fuzzy* em problemas práticos, é conveniente ressaltar que o Sistema de Inferência *Fuzzy* descrito neste tópico é do tipo *Mamdani*. Sua abordagem de forma mais detalhada foi escolhida pois, embora sua aplicação exija de maior esforço computacional quando comparado a outras metodologias de realizar a Inferência *Fuzzy*, ele possui a grande vantagem de retornar consistentemente resultados próximos aos desejados, i.e., Sistemas de Inferência *Fuzzy* do tipo *Mamdani* tendem a conferir robustez aos códigos em que forem aplicados (NEGNEVITSKY, 2005, p. 124).

Por fim, na Figura 13 é apresentada de forma visual as fases de *Fuzzificação*, aplicação de regras *Fuzzy*, agregação dos grupos de saída e *Defuzzyficação* de um Sistema de Inferência *Fuzzy* do tipo *Mamdani*.

Figura 13 – Processo de Inferência Fuzzy.



Fonte:(NEGNEVITSKY, 2005, p. 108).

2.3.3 Algoritmos de Otimização

Nos tópicos 2.3.1 e 2.3.2, foram apresentados conceitos e aplicações da Inteligência Artificial que demonstram a importância e a capacidade que essa ferramenta possui em resolver problemas nas mais diversas áreas. Já para este tópico, será abordado especificamente como esse recurso pode ser implementado no que se refere a garantir Proteção Adaptativa a relés em redes com GD.

Nesse tipo de problema, assim como em uma partida de xadrez, é inviável analisar todas as combinações possíveis, pois muitas vezes não há uma solução exata e, caso haja, o tempo de processamento necessário para atingi-la é impraticável (LUGER; STUBBLEFIELD, 1997, p. 124). Uma maneira de lidar com essa problemática é por meio da aplicação de um algoritmo o qual possa encontrar, em tempo viável, uma solução otimizada que satisfaça às necessidades da referida situação.

No intuito de atribuir ao algoritmo essas características operacionais, um artefato muito utilizado é a implementação do conceito chamado heurística. Tal ideia consiste no processo de identificar e eliminar, o mais rápido possível, os caminhos que não são promissores para o problema em questão (LUGER; STUBBLEFIELD, 1997, p. 124). A título de exemplo, considera-se um algoritmo elaborado para jogar xadrez, caso ele avalie que determinado lance não é bom para a sua posição, ele não irá calcular nenhuma das variantes as quais iniciem com esse lance, o que irá diminuir de maneira expressiva a quantidade de possibilidades que ele deverá avaliar.

Acresça-se, ainda, que uma das maiores aliadas da heurística aplicada a algoritmos é a Inteligência Artificial, uma vez que, com a aplicação de ferramentas como sistemas especialistas, algoritmos evolutivos e lógica *Fuzzy*, é possível atribuir ao código a característica da intuição, a qual contribui bastante na identificação das direções promissoras pelas quais o algoritmo deverá seguir.

Por fim, é interessante ressaltar uma variante importante dos algoritmos heurísticos, os meta-heurísticos. A diferença entre ambos reside no fato de que estes podem ser aplicados a uma variedade maior de situações, enquanto aqueles possuem características mais específicas para a resolução de determinado problema. Portanto, embora os algoritmos meta-heurísticos sejam mais flexíveis, eles não possuem o mesmo nível de desempenho quando comparados com os puramente heurísticos.

2.4 Estado da Arte

Na literatura, é notório o crescente número de pesquisas referentes a elaboração algoritmos de otimização voltados à coordenação de relés de sobrecorrente direcional em redes as quais contam com a presença de GD (e.g. SAMPAIO et al., 2022; AMRAEE, 2012; ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015; ZAIHAH JAMAL et al., 2018; SRINIVAS; SHANTI SWARUP, 2019; ABDELHAMID et al., 2022).

Sampaio et al. (2022), com base na meta-heurística *Bat Algorithm* (YANG, 2010) – inspirada no processo de eco localização de morcegos – e em sua versão otimizada, *Directional Bat Algorithm* (CHAKRI et al., 2017), desenvolveram o *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm* (AFDBA), o qual foi testado e validado em redes de 3, 9 e 30 barras.

Amraee (2012), baseado no *Seeker Optimization Algorithm* (CHAOHUA DAI et al., 2009) – inspirado no processo de busca humana e destinado originalmente à otimização de problemas de despacho econômico de potência reativa – desenvolveu sua própria versão do *Seeker Algorithm* (SA), o qual foi testado e validado em redes de 3, 8 e 15 barras.

Albasri, Alroomi e Talaq (2015), com base no algoritmo de otimização *Biogeography-Based Optimization* (SIMON, 2008) – inspirado nas modelagens matemáticas de distribuição geográfica de organismos biológicos – desenvolveram o *New Hybrid Biogeography-Based with Linear Programming* (BBO-LP), o qual foi testado e validado em redes de 3, 4, 8, 9 e 42 barras.

Zaihah Jamal et al. (2018), a partir do *Grey Wolf Optimizer* (SAHOO; CHANDRA, 2017) – inspirado no processo de caça de uma alcateia e destinado originalmente à otimização da classificação de lesões de cervix – desenvolveu o *Improved Grey Wolf Optimizer* (IGWO), o qual foi testado e validado em redes de 3, 8 e 15 barras.

Srinivas e Shanti Swarup (2019), assentado no *Mixed Integer Linear Programming* (DAMCHI et al., 2018) – o qual já era direcionado à coordenação de relés direcionais em redes com GD e considera valores discretos para a corrente de carga – desenvolveram sua própria versão do algoritmo (MILP), modificando a corrente de carga para uma variável contínua, e o aplicaram a redes de 3, 9, 15 e 30 barras.

Abdelhamid et al. (2022), a partir da meta-heurística *Tunic Swarm Algorithm* (KAUR et al., 2020) – inspirada nos processos de busca por alimentos de urocordados e destinada originalmente a problemas otimização global – desenvolveram sua própria versão do *Tunicate Swarm Algorithm* (TSA), o qual foi testado e validado em várias configurações diferentes de uma rede de 8 barras.

Nesse contexto, o presente trabalho se propõe realizar uma análise comparativa de todos os algoritmos citados neste tópico, no âmbito de avaliar a contribuição de Sampaio et al. (2022), no que diz respeito a elaboração de métodos de otimização aplicados à Proteção Adaptativa de relés de sobrecorrente direcional em redes com GD.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados os conceitos de Geração Distribuída, Proteção Adaptativa e Inteligência Artificial, os quais serão fundamentais para a compreensão do funcionamento e da implementação do AFDBA no software MATLAB. Ademais, foram apresentados algoritmos semelhantes presentes na literatura, os quais serão utilizados para qualificar o AFDBA perante o seu campo de aplicação.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados os processos metodológicos realizados neste estudo. Primeiramente, será demonstrado o funcionamento do AFDBA, elaborado por Sampaio et al. (2022). Em seguida, será feita a explanação de como é realizada a implementação do algoritmo em problemas de Proteção Adaptativa em redes com GD, por meio do software MATLAB. Posteriormente, serão apresentadas as Redes nas quais o código será aplicado. Seguidamente, será realizada a validação dos parâmetros dos retornados pelo AFDBA, de modo a investigar se as condições de restrição impostas foram acatadas. Por fim, serão formuladas as considerações finais no que se refere aos processos metodológicos deste estudo.

3.1 Algoritmo Desenvolvido por Sampaio et al. (2022) - AFDBA

3.1.1 Algoritmos de base

No intuito de entender o funcionamento do AFDBA, se faz necessário, primeiro, compreender o funcionamento das meta-heurísticas que foram utilizados de base para a sua elaboração: o *Bat Algorithm* (BA) e a sua versão otimizada, *Directional Bat Algorithm* (DBA).

Como foi dito no tópico 2.4, a meta-heurística BA, desenvolvida por Yang (2010), é inspirada no processo de eco localização de morcegos. Esses animais emitem sinais ultrassônicos no intuito de localizar obstáculos e potenciais presas, de modo que o tempo percorrido entre a emissão do sinal e a percepção do eco, a diferença desse tempo percebido por cada ouvido e a variação de frequência dos sinais é utilizada por eles para conceber com precisão o ambiente que estão inseridos (YANG, 2010). Além disso, a amplitude e a taxa de emissão dos sinais variam, de forma que a primeira diminui e a segunda aumenta à medida que a distância que a presa se encontra diminui. Portanto, as variáveis utilizadas pelos morcegos para se localizarem são: sua posição, sua velocidade de deslocamento, a frequência e amplitude dos sinais emitidos e a taxa de emissão deles.

Trazendo esses conceitos ao âmbito computacional, é gerada uma população de n morcegos, cada qual possui uma posição x_i e uma velocidade de deslocamento v_i , as quais são atualizadas de acordo com uma frequência f_i dos sinais emitidos (a qual varia uniformemente em um intervalo pré-estabelecido), em intervalos de tempo t como mostram as equações 3,4 e 5.

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \cdot aleat \quad (3)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x_*) \cdot f_i \quad (4)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (5)$$

Em que f_{min} e f_{max} são os valores mínimos e máximos de frequência de sinal, $aleat$ é um número aleatório entre 0 e 1 e x_* é a posição do melhor morcego – obtida por meio da elaboração pelo programador de uma função objetivo $F(x_i)$, a qual irá avaliar as posições de cada morcego.

Ademais, uma vez aplicada a função objetivo a todos os morcegos e definido o melhor, no intuito de investigar os arredores, é feita uma busca local de modo que uma nova posição é calculada para cada morcego e, caso ela possua menor função objetivo em relação à antiga, ela é aplicada. Essa nova posição é resultado da soma da posição velha e da amplitude de sinal média de todos os morcegos A^t (multiplicada por um valor aleatório ϵ , que varia de -1 a 1). Esse procedimento é representado pela equação 6.

$$x_{nova} = x_{velha} + \epsilon \cdot A^t \quad (6)$$

Acresça-se, ainda, que, assim como ocorre quando um morcego real vai se aproximando de sua presa, à medida que o algoritmo vai convergindo e aceitando novas soluções, na amplitude A_i dos sinais de cada morcego ocorre a mudança gradativa de um valor máximo (fase de exploração) a um valor mínimo (fase de intensificação), já na taxa de emissão r_i dos sinais de cada morcego ocorre mudança gradativa de um valor mínimo (fase de exploração) a um valor máximo (fase de intensificação). Essas ocorrências são representadas pelas equações 7 e 8.

$$A_i^{t+1} = \alpha \cdot A_i^t \quad (7)$$

$$r_i^{t+1} = (1 - e^{-\gamma t}) \cdot r_i^0 \quad (8)$$

Em que α e γ são constantes, tal que $0 < \alpha < 1$ e $\gamma > 0$. Analisando as Equações 7 e 8, percebe-se que, na medida que $t \rightarrow \infty$, $A_i^t \rightarrow 0$ e $r_i^t \rightarrow r_i^0$, confirmando os processos referentes à amplitude e taxa de emissão de sinais, conforme citado anteriormente. Ao final da execução do BA, é retornada como solução do problema estudado o morcego de melhor posição global.

Já a meta-heurística DBA, desenvolvida por Chakri et al. (2017), surge como uma

alternativa de contornar um empecilho enfrentado pelo BA, a convergência prematura. Para tal, foram feitas quatro modificações no algoritmo original, no intuito de otimizar ambas as fases de exploração e intensificação.

Primeiramente, no intuito de evitar que os movimentos de todos os morcegos sejam guiados exclusivamente pelo de melhor posição global x_* , nesse algoritmo é feita, para cada morcego x_i , uma comparação entre a sua avaliação pela função objetivo e a de outro escolhido aleatoriamente x_k . Caso a avaliação do morcego aleatório seja melhor, a nova posição do morcego avaliado é calculada com base nos morcegos x_* e x_k , caso contrário, apenas com base em x_* . Tal processo pode ser descrito pelas equações 9 e 10.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (x_* - x_i^t) \cdot f_1 + (x_k^t - x_i^t) \cdot f_2 \quad (9)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (x_* - x_i^t) \cdot f_1 \quad (10)$$

Em que a equação 9 é aplicada aos casos em que $F(x_k^t)$ é melhor que $F(x_i^t)$, cabendo ao programador, com base na natureza da aplicação, definir se “melhor” significa “maior” ou “menor”. Além disso, f_1 e f_2 são valores distintos e ambos calculados de acordo com a equação 3.

Outra modificação do DBA em relação ao BA está na busca local que cada morcego realiza. Tal alteração possui o intuito de possuir um controle ainda maior sobre as dimensões das buscas locais, de modo a se tornarem cada vez mais concentradas com o decorrer das iterações, e consiste na adição de um novo multiplicador w_i^t à equação 6, conforme demonstrado nas equações 11 e 12.

$$x_{nova} = x_{velha} + \epsilon \cdot A^t \cdot w_i^t \quad (11)$$

$$w_i^t = \left(\frac{\frac{U_b - L_b}{K} - \frac{U_b - L_b}{\sigma \cdot K}}{1 - t_{max}} \right) \cdot (t - t_{max}) + \frac{U_b - L_b}{\sigma \cdot K} \quad (12)$$

Em que U_b e L_b definem os limites superior e inferior, respectivamente, dos valores de x_i , t é a iteração atual, t_{max} é o limite de iterações e K e σ são constantes definidas pelo programador. Portanto, percebe-se que, para $t = 1$, w_i^t assume seu valor máximo de $\frac{U_b - L_b}{\sigma \cdot K}$ e vai decrescendo linearmente até atingir o zero, quando t atinge seu valor máximo (t_{max}).

Outrossim, foram feitas alterações também no cálculo de obtenção da amplitude A_i e da taxa de emissão r_i dos sinais. Enquanto no BA os valores desses parâmetros são atualizados de forma exponencial, vide equações 7 e 8, no DBA isso ocorre de maneira linear, de modo a evitar que o algoritmo fique preso em um mínimo local. Esse processo pode ser descrito pelas equações 13 e 14.

$$A_i^t = \left(\frac{A_0 - A_\infty}{1 - t_{max}} \right) \cdot (t - t_{max}) + A_\infty \quad (13)$$

$$r_i^t = \left(\frac{r_0 - r_\infty}{1 - t_{max}} \right) \cdot (t - t_{max}) + r_\infty \quad (14)$$

Em que A_0 é o valor da amplitude dos sinais na primeira iteração, o qual irá decrescer linearmente até o valor de A_∞ , na última iteração. De maneira oposta, r_0 , que é o valor da taxa de emissão dos sinais na primeira iteração, irá crescer linearmente até o valor de r_∞ , na última iteração.

Por fim, a última modificação consiste no fato de que, uma vez realizada as buscas locais, novas posições são aceitas, diminuindo a amplitude e aumentando a taxa de emissão dos sinais em seguida, caso elas possuam avaliação pela função objetivo melhor que a sua avaliação atual (diferentemente do BA, onde esse procedimento só ocorria caso uma nova posição tivesse avaliação melhor que a global).

3.1.2 Algoritmo de estudo

Neste trabalho, o AFDBA, desenvolvido por Sampaio et al. (2022) será aplicado, validado e comparado a semelhantes no intuito de averiguar a contribuição do AFDBA na notória área de estudo de Proteção Adaptativa por meio de Relés de Sobrecorrente Direcionais em Redes com GD. Todavia, antes de realizar esses procedimentos, é importante compreender o funcionamento desse algoritmo.

Como citado anteriormente, o AFDBA tomou como base os algoritmos BA e DBA, explanados no tópico 3.1.1. Portanto, seu funcionamento é análogo ao do DBA, diferindo deste no modo de determinação dos parâmetros frequência f_i , amplitude A_i e taxa de emissão r_i dos sinais emitidos pelos morcegos, além do peso de regulação de busca w_i . Tais parâmetros, os quais eram obtidos pelas equações 3, 13, 14 e 12, agora são variáveis de saída de uma inferência *Fuzzy* (cujo procedimento foi explanado no tópico 2.3.2).

Para obter os dados de entrada dessa inferência, denominados peso de iteração I e diversidade D_i , Sampaio et al. (2022) se utilizaram do número da iteração i e da distância d_i entre determinado morcego e o de melhor posição, conforme as equações 15, 16 e 17.

$$I = \frac{i}{i_{max}} \quad (15)$$

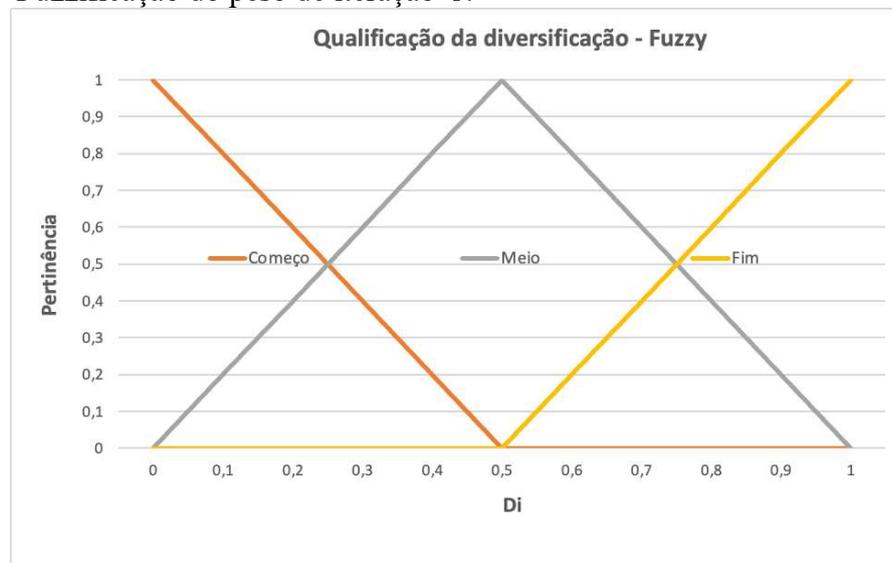
$$d_i = |x_i - x_*| \quad (16)$$

$$D_i = \frac{d_i - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \quad (17)$$

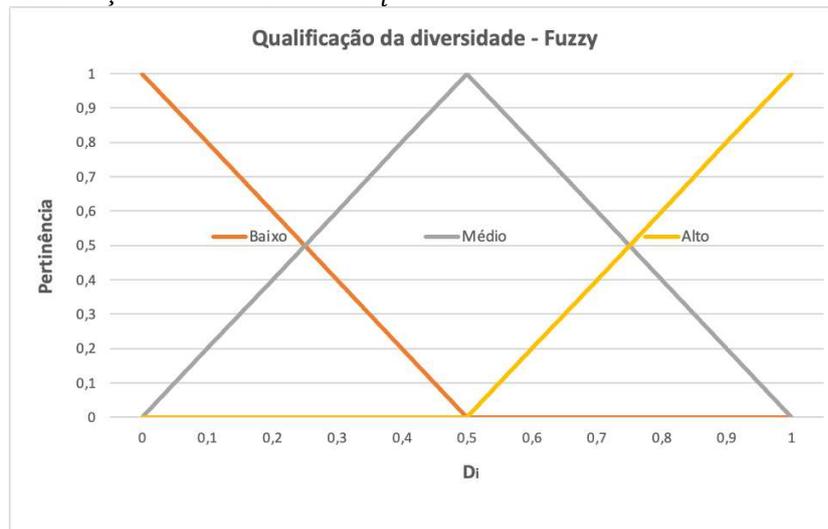
Em que i_{max} é o limite de iterações e d_{min} e d_{max} são as distâncias mínima e máxima entre morcegos. Ademais, nota-se que ambos I e D_i são valores entre 0 e 1. Quando I se aproxima de 1, indica que as iterações estão chegando ao fim, já quando D_i se aproxima de 1, indica que o morcego está gradativamente mais distante do morcego de melhor posição.

Uma vez inseridos esses valores de entrada, é realizada a Fuzzificação dos mesmos, i.e., são atribuídos graus de pertinência a ambos em relação a determinados grupos, conforme mostrado nos gráficos das Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Fuzzificação do peso de iteração I .



Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados (SAMPAIO et al., 2022).

Figura 15 – Fuzzificação da diversidade D_i .

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados (SAMPAIO et al., 2022).

Após a atribuição desses graus de pertinência aos dados de entrada, é aplicada uma sequência de nove regras *Fuzzy* no formato “Se I é X_1 e D_i é X_2 , então Δf é Y_1 , A_i é Y_2 , r_i é Y_3 e w_f é Y_4 ”. Todas essas regras podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Regras *Fuzzy* utilizadas no AFDBA.

Dados de Entrada		Dados de Saída			
I	D_i	Δf	A_i	r_i	w_f
Começo	Baixo	Alto	Alto	Baixo	Baixo
Começo	Médio	Alto	Alto	Baixo	Baixo
Começo	Alto	Meio Alto	Meio Alto	Meio Baixo	Meio Baixo
Meio	Baixo	Meio Alto	Meio Alto	Meio Baixo	Meio Baixo
Meio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Meio	Alto	Meio Baixo	Meio Baixo	Meio Alto	Meio Alto
Fim	Baixo	Meio Baixo	Meio Baixo	Meio Alto	Meio Alto
Fim	Médio	Meio Baixo	Meio Baixo	Meio Alto	Meio Alto
Fim	Alto	Baixo	Baixo	Alto	Alto

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados (SAMPAIO et al., 2022)

Acresça-se, ainda, que, conforme pode ser visto na Tabela 2, a aplicação das regras *Fuzzy* retornam diretamente os parâmetros A_i e r_i , entretanto, são retornadas as variáveis Δf e w_f , as quais serão utilizadas para calcular f_i e w_i , conforme as equações 18 e 19.

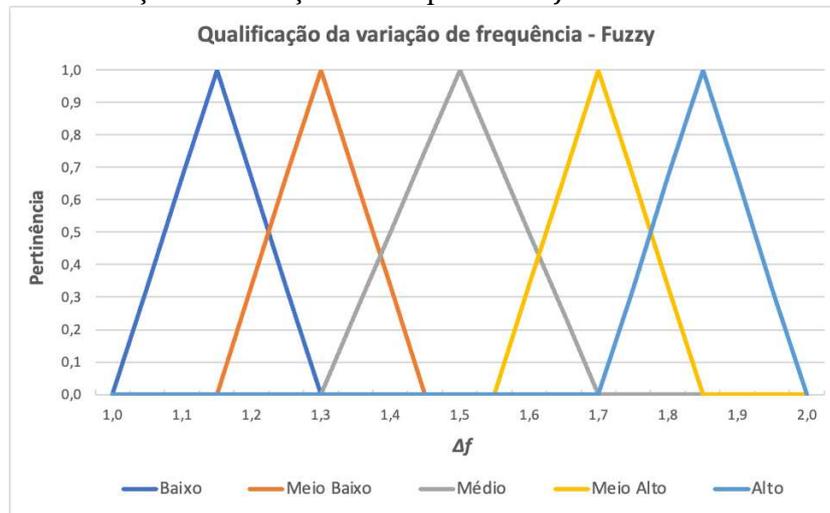
$$w_i = \frac{U_b - L_b}{w_f} \quad (18)$$

$$f_i = \Delta f \cdot aleat \quad (19)$$

Em que w_f é o tamanho do vetor w_i (varia de 0 a 500), Δf é a variação de frequência e $aleat$ é uma variável aleatória entre 0 e 1.

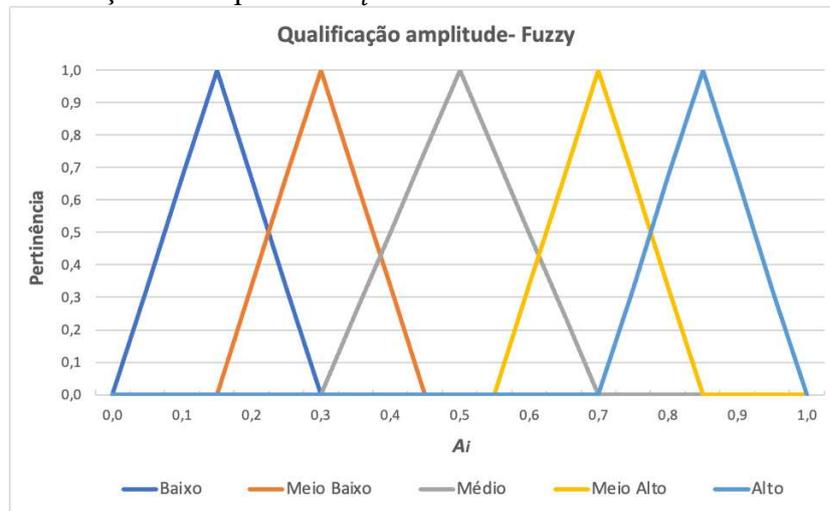
Outrossim, também pode ser visto na Tabela 2 que, a partir dos dois valores de entrada, as quatro variáveis de saída têm suas pertinências medidas em relação aos grupos *Fuzzy*: “Baixo”, “Meio Baixo”, “Médio”, “Meio Alto” e “Alto”. Essas classificações são demonstradas nos gráficos das Figuras 16, 17, 18 e 19.

Figura 16 – Fuzzificação da variação de frequência Δf .



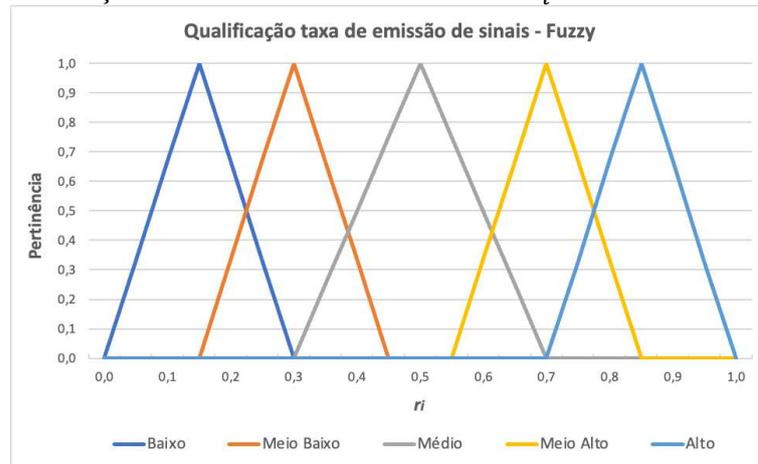
Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados (SAMPAIO et al., 2022).

Figura 17 – Fuzzificação da amplitude A_i .



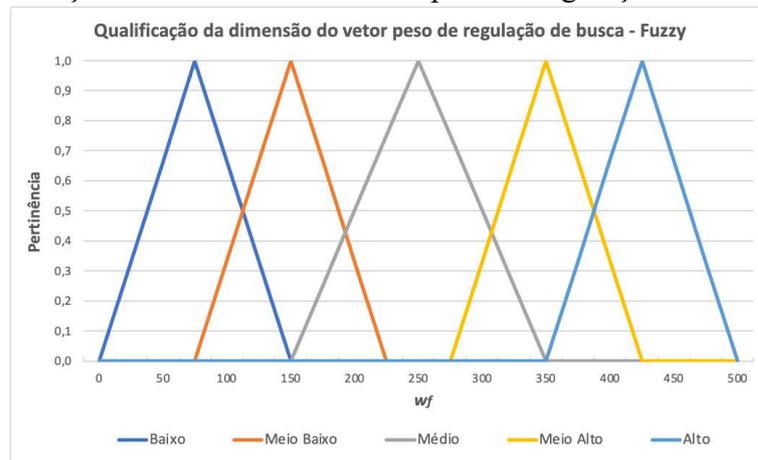
Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados (SAMPAIO et al., 2022).

Figura 18 – Fuzzificação da taxa de emissão de sinais r_i .



Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados (SAMPAIO et al., 2022).

Figura 19 – Fuzzificação do tamanho do vetor de peso de regulação de busca w_f .



Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados (SAMPAIO et al., 2022).

Em seguida, depois realizada a fuzzificação dos dados de entrada, a aplicações de todas as regras *Fuzzy*, é iniciado o processo de defuzzificação das variáveis de saída, e, uma vez finalizado, deverão ser aplicados os valores de w_f e Δf nas equações 18 e 19. Após todo esse processo, são retornados para o código os valores de f_i , A_i , r_i e w_i e as novas posições de todos os morcegos da população poderão ser definidas.

Por fim, é conveniente salientar que, devido à implementação da Inferência *Fuzzy*, não é mais necessário, como era no DBA, definir os parâmetros de entrada A_0 , A_∞ , r_0 , r_∞ , f_{min} e f_{max} , sendo necessário apenas informar o tamanho da população inicial de morcegos N_{pop} e o limite de iterações n_{iter} , i.e., o algoritmo independe de uma boa atribuição de parâmetros de entrada para convergir. Em contrapartida, o esforço computacional devido a essa inserção aumenta de maneira expressiva, devendo ser levado em consideração pelo usuário.

3.2 Implementação do AFDBA

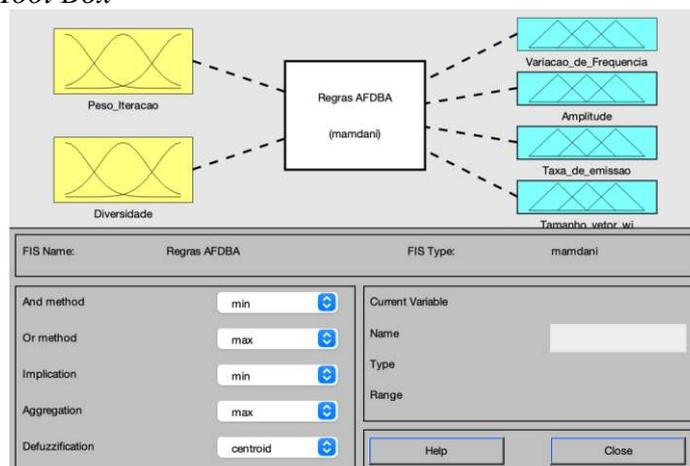
3.2.1 Software MATLAB

Para a implementação do AFDBA nesse estudo, assim como nos trabalhos de Sampaio et al. (2022), Amraee (2012), Zaihah Jamal et al. (2018) e Khurshaid et al. (2019), apresentados no tópico 2.4, foi utilizado o Software MATLAB @R2022a – por meio de um computador pessoal com processador Apple® M2 Pro™ @3.5GHz e 16GB de *Random Access Memory* (RAM). A popular escolha dessa plataforma em estudos de Proteção Adaptativa de relés de sobrecorrente direcional em redes com GD se deve ao fato de que, dentre as várias aplicações dessa ferramenta no campo da engenharia, uma que se destaca é a implementação de algoritmos de otimização.

Tal eficiência na resolução desse tipo de problema é decorrente da sua facilidade de uso, da eficiência computacional e otimização de desempenho, da grande flexibilidade fornecida (permitindo ao usuário criar e personalizar funções de otimização), da vasta documentação disponível na comunidade de usuários e da ampla biblioteca de funções e ferramentas destinadas a algoritmos de otimização disponibilizada pela plataforma.

Dentre os recursos disponibilizados pelo Software, o *Fuzzy Tool Box* é particularmente conveniente na implementação do AFDBA, uma vez que oferece uma gama de funcionalidades aplicáveis à modelagem de sistemas complexos de Inferência *Fuzzy*. Nessa ferramenta, apresentada na Figura 20, é possível realizar de maneira intuitiva as operações de definição dos grupos, criação de regras, operações de inferência e defuzzificação, além da construção de gráficos e plots oferecendo ao usuário um aspecto visual de todo os processos.

Figura 20 – *Fuzzy Tool Box*



Fonte: Elaborado pelo Autor

Portanto, haja vista o grande potencial do Software MATLAB na implementação de algoritmos de otimização e a sua conveniente ferramenta *Fuzzy Tool Box*, o presente trabalho seguirá a mesma escolha de Sampaio et al. (2022) de utilizá-lo em seu estudo.

3.2.2 AFDBA aplicado à Proteção Adaptativa

No tocante ao processo de implementação do AFDBA nas redes *IEEE* de três e oito barras, é seguido exatamente o procedimento explanado no tópico 3.1.2. É importante salientar que as posições dos morcegos (soluções do problema) são matrizes que seguem o formato apresentado na equação 20.

$$x_i = \begin{pmatrix} TAP_1 & DT_1 \\ TAP_2 & DT_2 \\ \vdots & \vdots \\ TAP_n & DT_n \end{pmatrix} \quad (20)$$

Em que n é o número de relés e TAP_n e DT_n são a corrente de ajuste e o dial de tempo do n -ésimo relé. Portanto, cada morcego possui uma posição x_i de n linhas e duas colunas.

Acresça-se, ainda, que em a função objetivo utilizada no presente trabalho para avaliar os parâmetros retornados é a mesma proposta por Sampaio et al. (2022), a qual leva em consideração o tempo de atuação de cada relé e as eventuais descoordenações entre o primário e o de backup na ocorrência de uma falta. Portanto, para essa aplicação, quanto menor o valor retornado pela função objetivo, mais apto é o morcego. Essa avaliação pode ser representada pela equação 21.

$$\min F(x_i) = \sum_{k=1}^F \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} \left((t_{op_{ik}}^2 + t_{op_{jk}}^2) + \kappa \left(\Delta t_{op_{ijk}} - \left| \Delta t_{op_{ijk}} \right| \right)^2 \right) \quad (21)$$

Em que o termo $(t_{op_{ik}}^2 + t_{op_{jk}}^2)$ representa a soma dos quadrados dos tempos de atuação dos relés primário e backup, $\left(\Delta t_{op_{ijk}} - \left| \Delta t_{op_{ijk}} \right| \right)^2$ representa a penalidade por descoordenação, de tal modo que $\Delta t_{op_{ijk}}$ seja a diferença entre a margem de coordenação do sistema (CTI) e o limite mínimo imposto (CTI_{min}) e κ seja um peso de descoordenação

atribuído pelo usuário. Ademais, F , N e M_i representam o número de faltas, o número de relés e o número de relés de backup de cada relé, respectivamente.

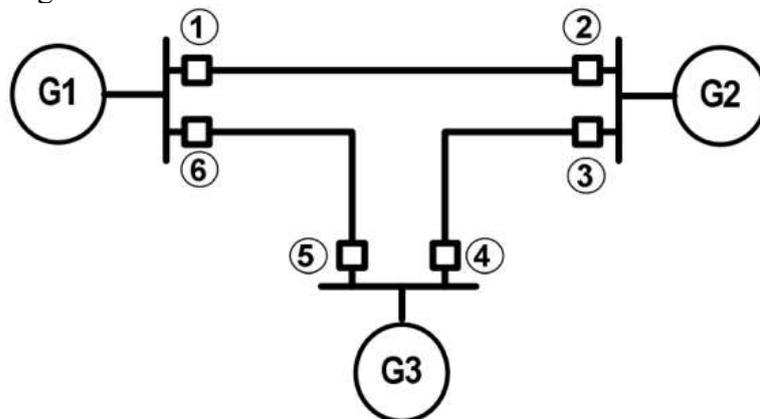
Deste modo, uma vez especificado o Software o qual o algoritmo será implementado e explanado como funciona a aplicação do AFDBA em problemas de Proteção Adaptativa, pode ser iniciado o processo definição e modelagem dos estudos de caso.

3.3 Estudos de caso

3.3.1 Rede IEEE de três Barras

Para o primeiro estudo de caso, foi escolhida a rede do *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)* de três barras, a qual é protegida por seis relés de sobrecorrente direcional. A sua topologia, relações de transformação dos TCs (RTCs) e correntes de curto-circuito nos pares de relés principal-backup podem ser vistos na Figura 21 e nas Tabelas 3 e 4.

Figura 21 – Topologia da rede IEEE de três barras.



Fonte: (AMRAEE, 2012)

Tabela 3 – Relações de Transformação dos TCs da rede IEEE de três barras.

Relé	RTC
1	300/5
2	200/5
3	200/5
4	300/5
5	200/5
6	400/5

Fonte: (AMRAEE, 2012)

Tabela 4 – Corrente de curto-circuito dos relés principal-backup da rede *IEEE* de três barras.

Relé Primário	Corrente de Curto (A)	Relé de Backup	Corrente de Curto (A)
1	1978,9	5	175
2	1525,7	4	545
3	1683,9	1	617,22
4	1815,4	6	466,17
5	1499,66	3	384
6	1766,3	2	145,34

Fonte: (AMRAEE, 2012)

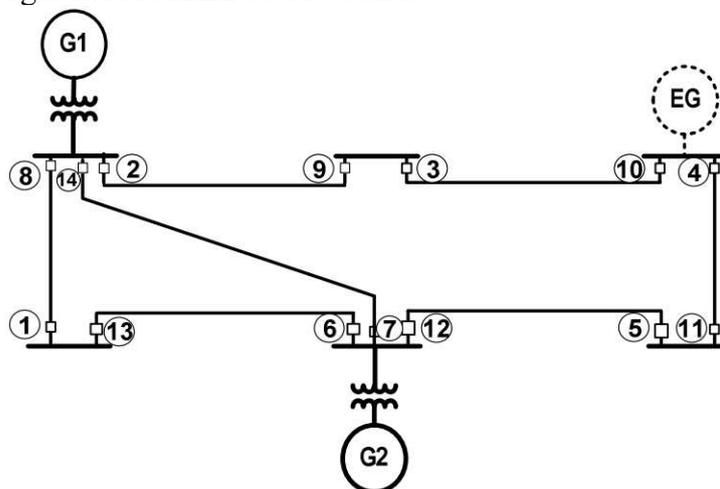
Essa rede foi implementada nos estudos de caso dos algoritmos SA, BBO-LP, IGWO e MILP (apresentados no tópico 2.4), tornando possível a comparação do desempenho dos mesmos ao AFDBA, o que justifica sua escolha para o presente trabalho.

Por fim, para este estudo de caso foram adotadas as seguintes definições: $TAP_{min} = 0,5A$, $TAP_{max} = 5,0A$, $DT_{min} = 0,1s$, $DT_{max} = 1,1s$, $t_{op_{min}} = 0,1s$, $t_{op_{max}} = 1,1s$, $CTI_{min} = 0,3s$, $\kappa = 120$, $N_{pop} = 50$ e $n_{iter} = 1000$. Ademais, o algoritmo foi compilado por um total de 1000 vezes, dentre as quais o melhor entre os 1000 melhores morcegos retornados foi selecionado para análise.

3.3.2 Rede *IEEE* de oito Barras

Já para o segundo estudo de caso, foi escolhida a rede *IEEE* de oito barras, a qual é protegida por 14 relés de sobrecorrente direcional. A sua topologia, RTCs e correntes de curto-circuito nos pares de relés principal-backup podem ser vistos na Figura 22 e nas Tabelas 5 e 6.

Figura 22 – Topologia da rede *IEEE* de oito barras.



Fonte: (AMRAEE, 2012)

Tabela 5 – Relações de Transformação dos TCs da rede *IEEE* de oito barras.

Relé	RTC
1	1200/5
2	1200/5
3	800/5
4	1200/5
5	1200/5
6	1200/5
7	800/5
8	1200/5
9	800/5
10	1200/5
11	1200/5
12	1200/5
13	1200/5
14	800/5

Fonte: (AMRAEE, 2012)

Tabela 6 – Corrente de curto-circuito dos relés principal-backup da rede *IEEE* de três barras.

Relé Primário	Corrente de Curto (A)	Relé de Backup	Corrente de Curto (A)
1	3232	6	3232
2	5924	1	996
2	5924	7	1890
3	3556	2	3556
4	3783	3	2244
5	2401	4	2401
6	6109	5	1197
6	6109	14	1874
7	5223	5	1197
7	5223	13	987
8	6093	7	1890
8	6093	9	1165
9	2484	10	2484
10	3883	11	2344
11	3707	12	3707
12	5899	13	987
12	5899	14	1874
13	2991	8	2991
14	5199	1	996
14	5199	9	1165

Fonte: (AMRAEE, 2012)

Nessa rede, além dos algoritmos SA, BBO-LP, IGWO e MILP, também foi implementado nela o algoritmo TSA, fazendo-se possível uma análise ainda mais aprimorada para o presente estudo.

Finalmente, que para essa rede foi adotado: $TAP_{min} = 0,5A$, $TAP_{max} = 2,5A$, $DT_{min} = 0,1s$, $DT_{max} = 1,1s$, $t_{op_{min}} = 0,1s$, $t_{op_{max}} = 1,1s$, $CTI_{min} = 0,3s$, $\kappa = 120$, $N_{pop} = 150$ e $n_{iter} = 1000$. Acresça-se, ainda, que, assim como no estudo de caso anterior, o algoritmo foi compilado por um total de 1000 vezes, dentre as quais o melhor entre os 1000 melhores morcegos retornados foi selecionado para análise.

3.4 Apuração da aplicabilidade dos parâmetros retornados

3.4.1 Primeiro estudo de caso

Para averiguar a viabilidade dos parâmetros retornados para a rede *IEEE* de três barras pelo AFDBA, confere-se se as condições de restrição impostas aos valores de corrente de ajuste ($0,5A \leq TAP_n \leq 5,0A$) e de dial de tempo ($0,1s \leq DT_n \leq 1,1s$). Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros retornados para o primeiro estudo de caso.

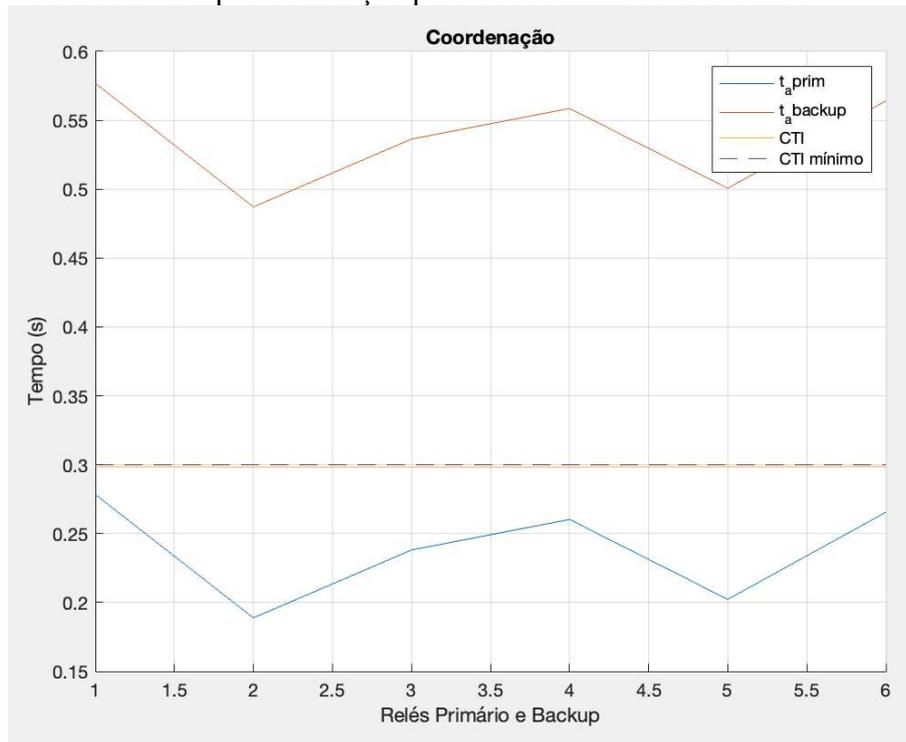
Tabela 7 – Valores de TAP e DT retornados à rede *IEEE* de três barras pelo AFDBA.

Relé	DT (s)	TAP (A)
1	0,1000	2,8366
2	0,1000	1,0664
3	0,1000	2,4177
4	0,1000	2,2027
5	0,1000	1,3193
6	0,1000	1,6902

Fonte: Elaborado pelo Autor

Portanto, analisando a Tabela 7 verifica-se que os valores de DT_n e TAP_n estão de acordo com as restrições estabelecidas a eles (i.e., são aplicáveis ao tipo de relé da rede estudada). Além disso, o gráfico da Figura 23 avalia se as condições de restrição aplicadas aos valores de tempo de operação ($0,1s \leq t_{op_n} \leq 1,1s$) e margem de coordenação dos relés ($CTI \geq 0,3s$) foram acatadas.

Figura 23 – Gráfico de tempos de atuação para a rede *IEEE* de três barras.



Fonte: Elaborado pelo Autor

O gráfico da Figura 23, o qual foi elaborado por meio da aplicação dos dados das Tabelas 3, 4 e 7 à Equação 1 (curva normal inversa), clarifica que ambos os tempos de operação dos relés primários e backup ficaram dentro dos valores pré-estabelecidos. Além disso, o gráfico mostra que a margem de coordenação entre os relés apresentou valores próximos ao limite mínimo estabelecido (com uma descoordenação de aproximadamente 0,5%).

3.4.2 Segundo estudo de caso

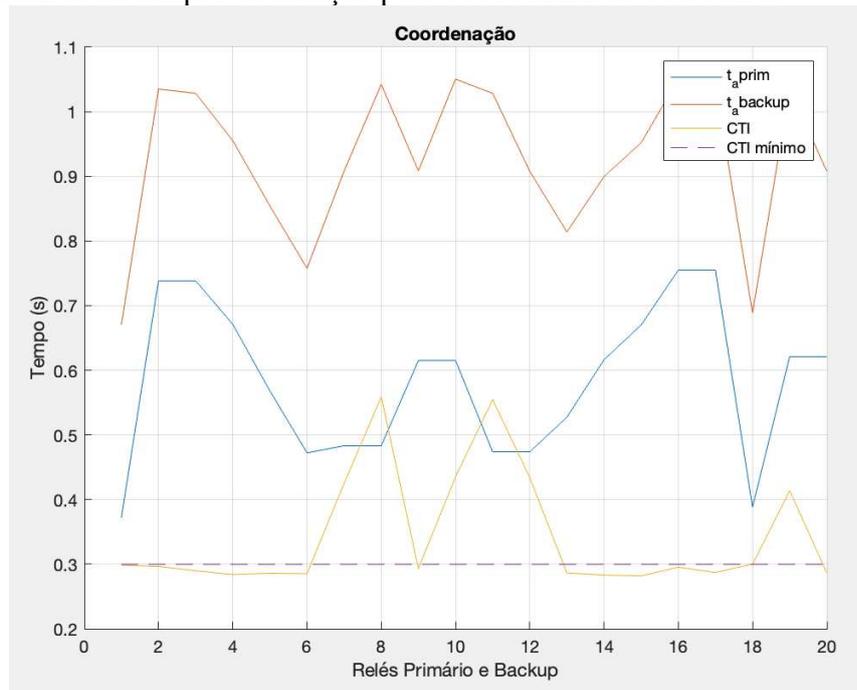
Repetindo o procedimento realizado no tópico 3.4.1, serão verificadas as condições de restrição estabelecidas aos valores de corrente de ajuste ($0,5A \leq TAP_n \leq 2,5A$) e de dial de tempo ($0,1s \leq DT_n \leq 1,1s$) para a rede de oito barras. Na tabela 8 estão presentes os parâmetros retornados pelo AFDBA.

Tabela 8 – Valores de TAP e DT retornados à rede *IEEE* de oito barras pelo AFDBA.

Relé	DT (s)	TAP (A)
1	0,1001	2,1187
2	0,2472	2,5000
3	0,2141	2,5000
4	0,1522	2,4990
5	0,1000	2,3218
6	0,1640	2,4999
7	0,2317	2,4999
8	0,1606	2,5000
9	0,1401	2,5000
10	0,1676	2,4996
11	0,1775	2,4997
12	0,2522	2,4998
13	0,1000	2,1213
14	0,2336	2,4989

Fonte: Elaborado pelo Autor

Deste modo, pela análise da Tabela 8, confirma-se que os valores de DT_n e TAP_n são aplicáveis ao tipo de relé da rede estudada. Ademais, foi utilizado o gráfico da Figura 24 para verificar as restrições aplicadas aos valores de tempo de operação ($0,1s \leq t_{opn} \leq 1,1s$) e margem de coordenação dos relés ($CTI \geq 0,3s$).

Figura 24– Gráfico de tempos de atuação para a rede *IEEE* de oito barras.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Por meio do gráfico da Figura 24 verifica-se que ambos os tempos de operação dos relés primários e backup ficaram dentro dos valores pré-estabelecidos. Além disso, percebe-se que em alguns casos o algoritmo apresentou uma leve descoordenação (de aproximadamente 4%), o que deve ser levado em consideração, porém ainda é um desvio notavelmente pequeno.

3.5 Considerações Finais

Destarte, uma vez explanado o funcionamento do AFDBA, exibido o software no qual o código foi implementado, elaborado o conjunto solução e a função objetivo, apresentadas as redes utilizadas para estudo de caso e confirmado o cumprimento de todas as condições de restrição estabelecidas, foi possível confirmar que o AFDBA é apto a garantir Proteção Adaptativa, por intermédio de relés de sobrecorrente direcional, a redes com GD.

4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Neste capítulo, haja vista a confirmação da aplicabilidade do AFDBA em problemas de Proteção Adaptativa, será realizada, para as redes apresentadas no tópico 3.3, uma análise comparativa de desempenho entre ele e os algoritmos SA, BBO-LP, IGWO, MILP e TSA – apresentados no tópico 2.4. Para tal, serão realizadas avaliações em termos de velocidade de atuação, esforço computacional e robustez. Além disso, serão feitos, ao final do capítulo, o levantamento e o parecer das diferenças operacionais entre a implementação original do AFDBA, em Sampaio et al. (2022), e a realizada no presente trabalho.

4.1 Velocidade de Atuação

Primeiramente, para a rede *IEEE* de três barras, foram coletados os dados de dialeto de tempo corrente de ajuste retornados para cada um dos relés, de todas as meta-heurísticas a serem realizadas. Tais achados, em conjunto com os parâmetros retornados pelo AFDBA, se encontram na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros Retornados pelos algoritmos para a Rede IEEE de três barras

SA		BBO-LP		IGWO		MILP		AFDBA	
DT (s)	TAP (A)								
0,1070	2,5000	0,1067	2,5000	0,1000	1,5000	0,1000	2,9367	0,1000	2,8366
0,1080	2,0000	0,1083	2,0000	0,1000	2,6166	0,1000	1,5000	0,1000	1,0664
0,1000	3,0000	0,1000	3,0000	0,1001	2,9770	0,1000	2,7782	0,1000	2,4177
0,1000	2,5000	0,1000	2,5000	0,1000	1,5858	0,1000	2,3420	0,1000	2,2027
0,1000	2,5000	0,1000	2,5000	0,1000	2,8169	0,1000	1,5000	0,1000	1,3193
0,1120	1,5000	0,1119	1,5000	0,1000	1,5009	0,1000	1,7817	0,1000	1,6902

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados de (AMRAEE, 2012; ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015; ZAIHAH JAMAL et al., 2018; SRINIVAS; SHANTI SWARUP, 2019)

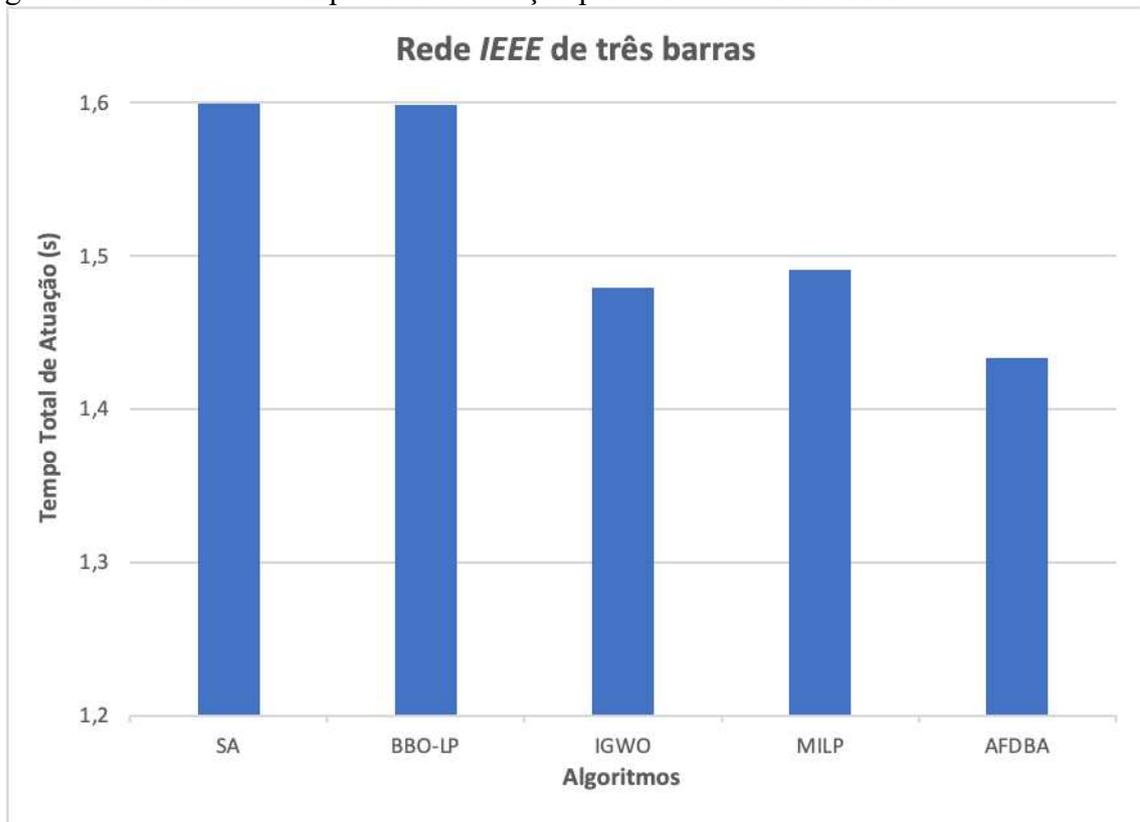
Em seguida, por intermédio da aplicação dos dados apresentados nas Tabelas 3, 4 e 9 na Equação 1 (utilizando a curva normal inversa), foram calculados, para cada um dos algoritmos, os tempos de atuação de cada um dos relés primários na ocorrência de suas respectivas faltas. Em seguida, esses valores foram somados, obtendo assim, para cada um dos algoritmos estudados, o principal critério de comparação do presente estudo, o tempo total de atuação dos relés (TTA). Esses valores estão exibidos na Tabela 10 e no gráfico da Figura 25.

Tabela 10 – Tempo Total de Atuação dos relés de cada algoritmo para a rede de três barras

Algoritmo	TTA (s)
SA	1,5991
BBO-LP	1,5987
IGWO	1,4789
MILP	1,4909
AFDBA	1,4331

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 25 – Gráfico do tempo total de atuação para a rede de três barras.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Analisando a Tabela 10 e o gráfico da Figura 25, tem-se que o algoritmo AFDBA apresentou menor tempo total de atuação, o IGWO o segundo menor (seguido de um notório acréscimo em relação ao AFDBA), o MILP o terceiro (um pouco superior ao anterior) e os algoritmos SA e BBO-LP praticamente empatados com os maiores tempos. Portanto é evidente melhor desempenho do AFDBA, para esse critério de avaliação na rede *IEEE* de três barras, em comparação aos demais.

Repetindo o mesmo processo de coleta dos dados de dial de tempo e corrente de atuação realizado para o primeiro estudo de caso, foram obtidos os parâmetros retornados para a rede *IEEE* de oito barras, os quais estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros Retornados para a Rede IEEE de oito barras

SA		BBO-LP		IGWO		MILP		TSA		AFDBA	
DT (s)	TAP (A)										
0,1130	2,0000	0,1000	2,5000	0,1000	1,5000	0,0772	2,5000	0,1980	0,9127	0,1001	2,1187
0,2600	2,5000	0,3033	2,0000	0,1000	4,4101	0,2548	2,5000	0,3550	0,7961	0,2472	2,5000
0,2250	2,5000	0,2358	2,5000	0,1722	4,9957	0,2185	2,5000	0,1760	2,7168	0,2141	2,5000
0,1600	2,5000	0,2204	1,5000	0,4350	5,0000	0,1531	2,5000	0,1180	3,0914	0,1522	2,4990
0,1000	2,5000	0,1000	2,5000	0,1001	1,5082	0,0929	2,5000	0,1000	2,2417	0,1000	2,3218
0,1730	2,5000	0,1734	2,5000	0,1015	1,5048	0,1506	2,5000	0,1890	2,3024	0,1640	2,4999
0,2430	2,5000	0,2532	2,5000	0,1055	1,9719	0,2391	2,5000	0,3700	0,7261	0,2317	2,4999
0,1700	2,5000	0,3481	0,5000	0,1004	4,4778	0,1484	2,5000	0,2520	1,2441	0,1606	2,5000
0,1470	2,5000	0,1487	2,5000	0,1000	4,7092	0,1473	2,5000	0,1870	1,4591	0,1401	2,5000
0,1760	2,5000	0,2052	2,0000	0,1001	4,2285	0,1759	2,5000	0,1880	2,0557	0,1676	2,4996
0,1870	2,5000	0,1920	2,5000	0,1015	1,6762	0,1869	2,5000	0,1640	2,5757	0,1775	2,4997
0,2660	2,5000	0,2715	2,5000	0,1011	2,2784	0,2664	2,5000	0,2110	2,8522	0,2522	2,4998
0,1140	2,0000	0,1154	2,0000	0,1052	1,5139	0,0784	2,0000	0,2210	0,7286	0,1000	2,1213
0,2460	2,5000	0,2493	2,5000	0,1015	2,0523	0,2459	2,5000	0,1930	2,7015	0,2336	2,4989

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados de (AMRAEE, 2012; ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015; ZAIHAH JAMAL et al., 2018; SRINIVAS; SHANTI SWARUP, 2019; ABDELHAMID et al., 2022)

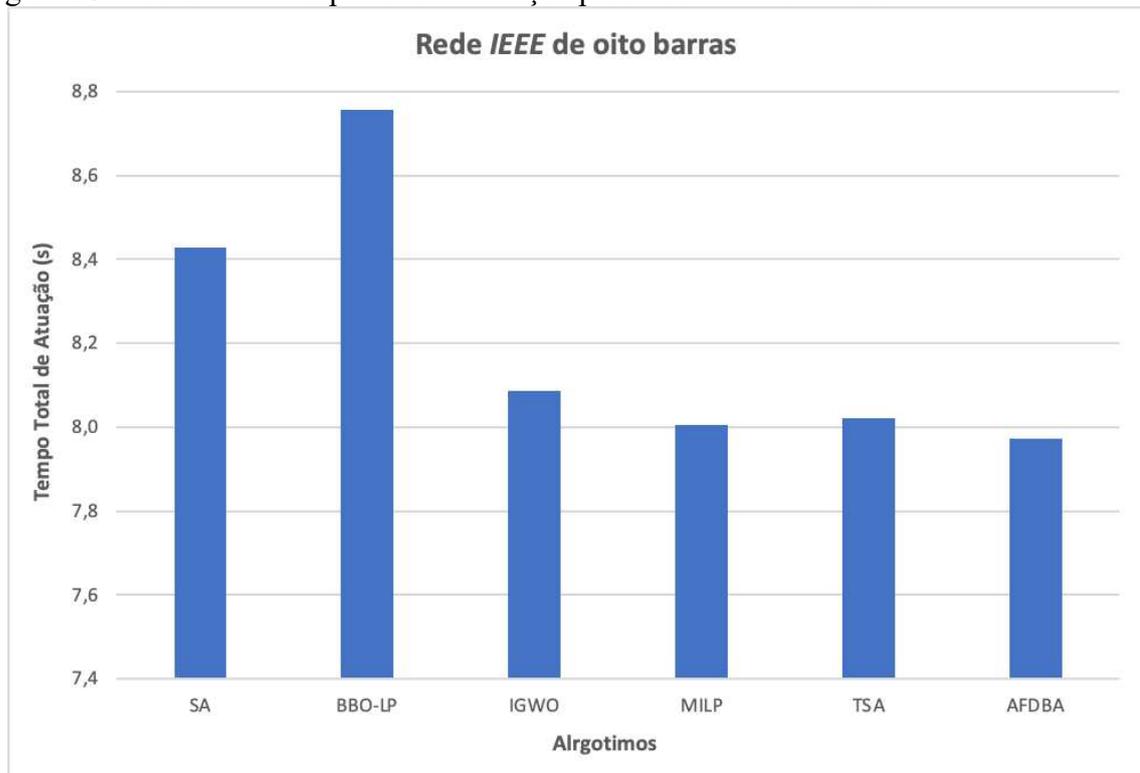
Deste modo, nota-se a presença de um algoritmo a mais sendo avaliado, o TSA de Abdelhamid et al. 2022, o qual, por ser ainda mais recente que o AFDBA, traz consigo uma grande contribuição a essa análise. Em seguida, aplicando os dados das Tabelas 5, 6 e 11 na Equação 1 (utilizando a curva muito inversa) foram obtidos os TTAs para esse caso de estudo, como mostram a Tabela 12 e o gráfico da Figura 26.

Tabela 12 – Tempo Total de Atuação dos relés de cada algoritmo para a rede de 8 barras

Algoritmo	TTA (s)
SA	8,4270
BBO-LP	8,7556
IGWO	8,0865
MILP	8,0061
TSA	8,0210
AFDBA	7,9725

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 26 – Gráfico do tempo total de atuação para a rede de oito barras.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Averiguando os dados da Tabela 12 e da Figura 26, consta-se, novamente, que o algoritmo AFDBA apresentou menor tempo total de atuação (sendo o único abaixo da faixa dos oito segundos), o MILP o segundo (apresentando grande melhoria em relação ao primeiro

estudo de caso), o TSA o terceiro (demostrando a eficácia esperada de um algoritmo recente), o IGWO em quarto (denotando notória queda de colocação em relação à apresentada na rede de três barras), o SA em quinto (superando em muito o algoritmo com o qual estava praticamente empatado no caso anterior) e o BBO-LP em sexto (exprimindo tempo bem superior em relação aos demais).

Deste modo, o AFDBA apresentou também para a rede *IEEE* de oito barras o melhor desempenho nesse critério, constatando, assim, sua dominância no que diz respeito ao critério do tempo total de atuação dos relés.

Vale salientar também que, embora o algoritmo MILP seja destinado a encontrar a solução ótima de determinado problema, aspectos construtivos dos códigos, como a elaboração de diferentes funções objetivo e a adoção de diferentes tolerâncias à descoordenação, fazem que a solução otimizada retornada pelo AFDBA possua melhor desempenho no critério de TTA que a solução ótima para as condições definidas pelo MILP.

Por fim, é importante ressaltar que a avaliação do somatório dos tempos de atuação dos relés é de suma importância pois, como foi apresentado no tópico 2.2.1, uma das funções primordiais de um sistema de proteção consiste no desligamento da zona afetada pela falta no menor tempo possível, prevenindo assim o comprometimento da linha, a danificação dos equipamentos e até explosões.

4.2 Esforço Computacional

No intuito de averiguar o desempenho do AFDBA no que diz respeito ao Esforço Computacional, foram comparados, para os estudos os quais abordaram essa temática, os tempos necessários para obtenção da solução otimizada de cada algoritmo (T_{ef}). Tal apanhado está disposto na Tabela 13.

Tabela 13 – Tempo eficaz de cada algoritmo para a rede de 3 barras

Algoritmo	T_{ef} (s)
SA	6,45
BBO-LP	2,99
MILP	0,016
AFDBA	0,5086

Elaborado pelo Autor com base nos dados de (AMRAEE, 2012; ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015; SRINIVAS; SHANTI SWARUP, 2019)

Analisando a Tabela 13 acima, percebe-se que o algoritmo de Sampaio et al. (2022) apresenta tempo eficaz inferior quando comparado aos dos algoritmos SA e BBO-LP, e superior em relação ao do MILP.

Todavia, essa não é uma comparação justa, pois o AFDBA neste estudo foi compilado em uma máquina mais recente e mais potente que as dos demais. Portanto, para assegurar uma comparação mais justa entre os algoritmos nesse critério, foi realizada a normalização do T_{ef} por meio da razão entre as velocidades de processamento das máquinas. Tal valor normalizado ($T_{ef_{normal}}$) representa uma estimativa tempo de processamento que os outros algoritmos teriam apresentado, caso tivessem sido compiladas na máquina utilizada para o presente estudo). Esses valores convertidos estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Tempo eficaz normalizado de cada algoritmo para a rede de 3 barras

Algoritmo	$T_{ef_{normal}}$ (s)
SA	0,645
BBO-LP	0,299
MILP	0,003
AFDBA	0,5086

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados de (AMRAEE, 2012; ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015; SRINIVAS; SHANTI SWARUP, 2019)

Deste modo, percebe-se que o AFDBA apresentou o segundo pior desempenho nesse critério. Esse panorama era esperado, pois, como foi dito no tópico 3.1.3, embora a inclusão do Sistema de Inferência *Fuzzy* tenha trazido vários benefícios ao código, a sua maior desvantagem é o considerável aumento de esforço computacional envolvido.

É importante ressaltar que o método de normalização por meio da razão entre as velocidades de processamento das máquinas foi testado e validado, com erros inferiores a 10%. Esse teste foi feito por intermédio da implementação do AFDBA, com as mesmas condições iniciais e para as mesmas redes analisadas em Sampaio et al. (2022), e comparado o tempo de processamento obtido com a estimativa calculada com base no tempo exposto no estudo.

Ademais, é importante salientar que, embora não seja possível realizar a comparação desse quesito para a rede *IEEE* de oito barras (devido à escassez desses dados nos estudos analisados), para o segundo estudo de caso o tempo eficaz do AFDBA foi de aproximadamente 2,5s. Tal informação é de grande relevância, pois, de acordo com o Módulo 8 das Regras e Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) o tempo limite de uma parada em uma rede de distribuição é de 180s.

Portanto, embora o AFDBA de fato apresente grande esforço computacional quando comparado a outras meta-heurísticas, ele foi capaz de recalculer os parâmetros de ambas redes analisadas em tempos inferiores a 2% do limite recomendado. Tal dado sugere que, apesar de haver uma maior quantidade de dispositivos em redes reais (além de outros tempos envolvidos), o AFDBA dispõe de uma margem suficiente grande para lidar com tais situações.

4.3 Robustez

Sabe-se que, de acordo com o que foi explanado no tópico 2.3, devido ao fato dos algoritmos de otimização necessitarem ser iniciados com uma população aleatória, a escolha desses espécimes iniciais pode afetar no resultado final do código. Por isso, outro aspecto importante de ser avaliado é a capacidade do algoritmo de fornecer consistência nos resultados, i.e., apresentar pouca variação nas soluções retornadas. Essa qualidade é denominada robustez.

Tendo isso em consideração, uma das maneiras de avaliar a robustez de um algoritmo é por da compilação o código varias vezes, seguido da aferição da melhor resposta (solução), da média e do desvio padrão das soluções retornadas. Portanto, para os algoritmos que abordaram essa temática e estão no escopo dessa análise comparativa, estão dispostos na Tabela 15 os valores dessas métricas referentes aos resultados do primeiro estudo de caso.

Tabela 15 – Solução, Média e Desvio Padrão de cada algoritmo para a rede de 3 barras

Algoritmo	Solução (s)	Média (s)	Desvio Padrão (s)
BBO-LP	1,5987	1,66487	0,03601
IGWO	1,4789	1,5165	0,01150
AFDBA	1,4331	1,4331	0,00054

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados de (ALBASRI; ALROOMI; TALAQ, 2015; ZAIHAH JAMAL et al., 2018;)

Por meio da análise da Tabela 15, é notório o melhor desempenho do AFDBA, para o primeiro estudo de caso, em relação aos algoritmos BBO-LP e IGWO. Tal afirmação é justificada pelo fato do código desenvolvido por Sampaio et al. (2022) ter exibido o menor desvio padrão, além de, para uma precisão de quatro casas decimais, apresentar média e solução de mesma magnitude.

Outrossim, o mesmo procedimento demonstrado anteriormente foi realizado para avaliar o critério da robustez no que diz respeito ao segundo estudo de caso. A Tabela 16 exibe as métricas coletadas para essa análise.

Tabela 16 – Solução, Média e Desvio Padrão de cada algoritmo para a rede de 8 barras

Algoritmo	Solução (s)	Média (s)	Desvio Padrão (s)
TSA	8,0210	8,411	0,4436
AFDBA	7,9725	8,0856	0,1827

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados de (ABDELHAMID et al., 2022)

Averiguando os dados da Tabela 16, verifica-se que, embora só tenha sido possível a comparação com um outro artigo, o TSA, é importante a realização dessa análise, pois o estudo que elaborou esse algoritmo, Abdelhamid (2022), é tão recente quanto o do AFDBA, Sampaio et al. (2022). E, novamente, apresentou uma menor diferença entre a melhor solução e a média, além de um menor desvio padrão. Portanto, constata-se a superioridade desse algoritmo no que se refere ao critério de robustez.

4.4 AFDBA: Implementação original x presente estudo

Neste trabalho, algumas alterações foram feitas na implementação do AFDBA, em relação à de Sampaio et al. (2022). Tais mudanças fizeram que o desempenho do algoritmo no presente estudo apresentasse vantagens e desvantagens em relação ao original.

Primeiramente, embora a função objetivo – elaborada por Sampaio et al. (2022) e representada pela Equação 21 – ainda tenha sido utilizada para determinar o melhor morcego da compilação, a escolha do melhor morcego global (dentre todas as compilações) foi feita com base no Tempo Total de Atuação dos relés, como mostrado no tópico 4.1. Além disso, o peso de descoordenação, utilizado no cálculo da função objetivo, teve seu valor alterado de 100 para 120, fazendo que o algoritmo fosse menos tolerante à desvios na margem de coordenação.

Ademais, é importante acrescentar que o AFDBA também foi implementado na rede *IEEE* de três barras no estudo de Sampaio et al. (2022). Entretanto, na implementação original foi adotado de uma população de 100 morcegos em um total de 300 iterações, já na deste estudo a população escolhida foi de 50 em um total de 1000 iterações. Tais alterações fizeram que o algoritmo retornasse valores de corrente de atuação e dial de tempo diferentes para cada versão, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros retornados AFDBA à rede *IEEE* três barras: Original x Presente estudo

Sampaio et al. (2022)		Presente Estudo	
DT (s)	TAP (A)	DT (s)	TAP (A)
0,1000	2,8501	0,1000	2,8366
0,1000	1,5000	0,1000	1,0664
0,1000	2,4708	0,1000	2,4177
0,1000	2,3299	0,1000	2,2027
0,1000	1,5000	0,1000	1,3193
0,1000	1,7120	0,1000	1,6902

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados de (Sampaio et al., 2022)

Aplicando os dados das Tabelas 3, 4 e 17 na Equação 1 (curva normal inversa), são obtidos os tempos totais de atuação dos relés para cada uma das versões do algoritmo, os quais estão presentes na Tabela 18.

Tabela 18 – TTAs obtidos pelo AFDBA à rede *IEEE* três barras: Original x Presente estudo

Aplicação AFDBA	TTA (s)
Sampaio et al. (2022)	1,4717
Presente Estudo	1,4331

Fonte: Elaborado pelo Autor

Portanto, percebe-se que a implementação do AFDBA no presente estudo retornou ajustes os quais garantem tempos de atuação dos relés mais rápidos em casos de falta. Além disso, como o peso de descoordenação foi aumentado, a versão implementada no presente trabalho também apresentou menores desvios máximos da margem de coordenação (inferiores a 0,5%).

Entretanto, a implementação de Sampaio et al. (2022) apresentou melhor desempenho no critério de Esforço Computacional. Para a realização dessa análise, primeiramente foi realizada a normalização do tempo eficaz apresentado no estudo de Sampaio et al (2022), conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Tempo eficaz normalizado de cada aplicação do AFDBA à rede de 3 barras

Aplicação AFDBA	$T_{efnormal}$ (s)
Sampaio et al. (2022)	0,3947
Presente Estudo	0,5086

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados de (Sampaio et al., 2022)

Deste modo, é confirmado que, com a diminuição da população inicial, o algoritmo precisa de mais iterações para convergir e, conseqüentemente, o tempo eficaz para a implementação realizada no presente estudo é superior.

Ademais, pela análise da Tabela 20, a qual exibe as métricas de análise de robustez, verifica-se que, apesar de ambas as versões terem médias e soluções iguais para uma precisão de quatro casas decimais, há um desvio padrão inferior para a implementação de Sampaio et al (2022), i.e., a aplicação original do AFDBA conferiu ao algoritmo maior robustez.

Tabela 20 – Solução, Média e Desvio Padrão de cada versão do AFDBA para a rede de 3 barras

Aplicação AFDBA	Solução (s)	Média (s)	Desvio Padrão (s)
Sampaio et al. (2022)	1,4717	1,4717	0,00030
Presente Estudo	1,4331	1,4331	0,00054

Fonte: Elaborado pelo Autor com base nos dados de (Sampaio et al., 2022)

Por fim, é importante salientar que o presente trabalho realizou a implementação do AFDBA em um estudo de caso que ele jamais havia sido testado, a rede *IEEE* de oito barras, de modo a validar a aplicação do algoritmo e realizar a análise de seu desempenho em mais uma rede.

4.5 Considerações Finais

Destarte, após realizada a análise comparativa, constatou-se que o AFDBA apresentou o melhor desempenho, dentre os seis algoritmos analisados, nos critérios de Tempo Total de Atuação dos relés de Robustez. Ademais, foi confirmada a hipótese de que a presença do sistema de inferência *Fuzzy* causaria considerável impacto no Esforço Computacional, uma vez que o AFDBA apresentou o segundo pior desempenho no critério do tempo eficaz. Por fim, uma vez estabelecidas as diferenças entre a implementação do AFDBA no presente estudo e no original, de Sampaio et al. (2022), foi comprovado que seriam retornados parâmetros distintos, haja vista que a versão deste trabalho apresentou menor TTA e índice de descoordenação, enquanto o original demonstrou menor tempo eficaz e desvio padrão.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo geral ampliar a análise da contribuição do algoritmo de otimização de parâmetros de relés de sobrecorrente direcional AFDBA, desenvolvido por Sampaio et al. (2022), no que tange a Proteção Adaptativa de Redes com a Presença de Geração Distribuída. Para tal, foi proposta uma análise comparativa de desempenho entre o algoritmo em questão e semelhantes, cujos estudos se destacaram na literatura.

Uma vez identificados e apresentados os importantes algoritmos de mesma finalidade (SA, BBO-LP, IGWO, MILP e TSA), foram averiguados os estudos de caso nos quais as mesmas foram implementadas (redes *IEEE* de três e oito barras), além dos critérios utilizados na avaliação de seus desempenhos (velocidade de atuação, esforço computacional e robustez). Posteriormente, foi realizada a implementação do AFDBA nas redes escolhidas, no intuito de avaliar a aplicabilidade do mesmo nesses estudo de caso, por meio da confirmação da coordenação entre os relés e do respeito às condições de restrição estabelecidas aos valores de corrente de atuação e dial de tempo. Em seguida, após conferida a capacidade do algoritmo em garantir proteção adaptativa às redes estudadas, foram coletados os parâmetros retornados e dados necessários para a realização da análise comparativa de desempenho.

Com base nos resultados obtidos, foi averiguado que o AFDBA apresentou, para ambos as redes estudadas, menor tempo total de atuação dos relés e menor desvio padrão entre as respostas retornadas por cada compilação, conferindo a ele o melhor desempenho nos critérios de velocidade de atuação e esforço computacional. Todavia, o AFDBA apresentou o segundo maior tempo necessário para obter a solução otimizada, confirmando a ideia de que a inclusão do Sistema de Inferência *Fuzzy*, embora contribua para a qualidade e robustez dos parâmetros retornados pelo código, confere um aumento considerável de esforço computacional ao algoritmo.

Diante disso, pode-se afirmar que, dentre os algoritmos estudados, o AFDBA foi o que apresentou melhor desempenho no geral, pois retornou às redes de estudo, de maneira bastante consistente, parâmetros os quais conferem aos sistemas as maiores velocidades de atuação. E, embora tenha apresentado tempos de processamento superiores quando comparado aos dos demais algoritmos, esses valores são inferiores a 2% do limite de tempo recomendado pelo Módulo 8 do PRODIST da ANEEL. Portanto, foi confirmada a grande contribuição do algoritmo no que tange ao grande e hodierno desafio de garantir Proteção Adaptativa a Redes as quais contam com a presença de Geração Distribuída.

Por fim, no intuito de fomentar trabalhos futuros a respeito do tema, é importante ressaltar algumas limitações enfrentadas no presente estudo. Primeiramente, para realizar a comparação dos tempos de processamento dos algoritmos, foi necessária a normalização desses valores, por meio da razão entre as frequências de processamento da máquina, no intuito de estimar qual teria sido esse tempo caso o algoritmo tivesse sido compilado na máquina utilizada neste estudo. Já no que toca as métricas necessárias à aferição da robustez (média e desvio padrão), apenas três dos cinco estudos escolhidos na literatura abordaram essa temática. Portanto, para tornar a análise comparativa ainda mais detalhada, sugere-se a implementação dos algoritmos listados no presente estudo em uma mesma máquina, além da elaboração de uma análise de Delineamento Fatorial, no intuito de definir estatisticamente a melhor combinação dos valores de entrada de cada um dos algoritmos.

REFERÊNCIAS

ABDELHAMID, M. et al. **Adaptive Coordination of Distance and Direction Overcurrent Relays in Active Distribution Networks Based on the Tunicate Swarm Algorithm**. 2022 12th Smart Grid Conference, SGC 2022. **Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.**, 2022.

ALBASRI, F. A.; ALROOMI, A. R.; TALAQ, J. H. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Biogeography-Based Optimization Algorithms. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 4, p. 1810–1820, 1 ago. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL nº 956/2021: **Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica - Módulo 8**. 2021.

AMRAEE, T. Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 3, p. 1415–1422, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS E DE CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS. Número PCHs e CGHs em operação no Brasil?. Disponível em: <https://abrapch.org.br/faq/numero-pchs-e-cghs-em-operacao-no-brasil/>. Acesso em: 02 out. 2023.

BARRANCO-CARLOS, A. et al. Adaptive Protection for Active Distribution Networks: An Approach Based on Fuses and Relays with Multiple Setting Groups. **IEEE Access**, v. 11, p. 31075–31091, 2023.

CAI, S. et al. Hybrid Stochastic-Robust Service Restoration for Wind Power Penetrated Distribution Systems Considering Subsequent Random Contingencies. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 13, n. 4, p. 2859–2872, jul. 2022.

CHAKRI, A. et al. New directional bat algorithm for continuous optimization problems. **Expert Systems with Applications**, v. 69, p. 159–175, 1 mar. 2017.

CHAOHUADAI et al. Seeker Optimization Algorithm for Optimal Reactive Power Dispatch. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 3, p. 1218–1231, ago. 2009.

DAMCHI, Y. et al. MILP approach for optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. **Electr. Power Syst. Res.**, v. 158, 2018.

ENERDATA. **Electricity Domestic Consumption**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>. Acesso em: 27 set. 2023.

GUTIERREZ-ROJAS, D. et al. Review of the State-of-the-Art on Adaptive

Protection for Microgrids based on Communications. 30 jun. 2020.

HATZIARGYRIOU, N. **Microgrids: Architecture and Control**. Chichester: Wiley, 2014.

KAUR, S. et al. Tunicate Swarm Algorithm: A new bio-inspired based metaheuristic paradigm for global optimization. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 90, 2020.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Florianópolis: [s.n.]. v. 1

LUGER, G. F.; STUBBLEFIELD, W. A. **Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving**. 3. ed. Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman, Inc., 1997.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC | Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2022.

MARTIN, K. T. et al. Mixed Integer Linear Programming Applied to Adaptive Directional Overcurrent Protection Considering N-1 Contingency. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, n. 3, p. 2807–2821, 1 maio 2023.

NAVEEN, P.; JENA, P. Adaptive Protection Scheme for Microgrid with Multiple Point of Common Couplings. **IEEE Systems Journal**, v. 15, n. 4, p. 5618–5629, 1 dez. 2021.

NEGNEVITSKY, M. **Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems**. 2. ed. Harlow: Addison-Wesley, 2005.

SAHOO, A.; CHANDRA, S. Multi-objective Grey Wolf Optimizer for improved cervix lesion classification. **Applied Soft Computing**, v. 52, p. 64–80, mar. 2017.

SAMPAIO, F. C. et al. Adaptive fuzzy directional bat algorithm for the optimal coordination of protection systems based on directional overcurrent relays. **Electric Power Systems Research**, v. 211, 1 out. 2022.

SAMPAIO, F. C. et al. Smart Protection System for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities Based on an Adaptive Algorithm. **Energies**, v. 16, n. 5, 1 mar. 2023.

SIMON, D. Biogeography-based optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 12, n. 6, p. 702–713, 2008.

SRINIVAS, S. T. P.; SHANTI SWARUP, K. A New Mixed Integer Linear Programming Formulation for Protection Relay Coordination Using Disjunctive Inequalities. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, v. 6, n. 2, p. 104–112, 25 mar. 2019.

USAMA, M. et al. A comprehensive review on protection strategies to mitigate the impact of renewable energy sources on interconnected distribution networks. **IEEE Access**, v. 9, p. 35740–35765, 2021.

WONG, J. Y. R. et al. Selectivity Problem in Adaptive Overcurrent Protection for Microgrid With Inverter-Based Distributed Generators (IBDG): Theoretical Investigation and HIL Verification. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 37, n. 4, p. 3313–3324, 1 ago. 2022.

YANG, X. S. **A new metaheuristic Bat-inspired Algorithm**. Studies in Computational Intelligence. **Anais...**2010.

ZAIHAH JAMAL, N. et al. **Optimal Overcurrent Relays Coordination using an Improved Grey Wolf Optimizer(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.ijacsa.thesai.org>.

ZAROOUR, E. et al. A new adaptive protection approach for overcurrent relays using novel nonstandard current-voltage characteristics. **Electric Power Systems Research**, v. 216, 1 mar. 2023.