



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

**ARTHUR DA SILVA TORRES**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
FOTOVOLTAICA UTILIZANDO O OPENDSS APLICADO À PROTEÇÃO  
ADAPTATIVA DE RELÉS**

**FORTALEZA**  
**2025**

ARTHUR DA SILVA TORRES

ANÁLISE COMPARATIVA DA IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
FOTOVOLTAICA UTILIZANDO O OPENDSS APLICADO À PROTEÇÃO ADAPTATIVA  
DE RELÉS

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: Eng. Lucas Macena Lima da Silva.

FORTALEZA

2025

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)

---

T643a Torres, Arthur da Silva.  
Análise comparativa da implementação de geração distribuída fotovoltaica utilizando o OpenDSS aplicado à proteção adaptativa de relés / Arthur da Silva Torres. – 2025.  
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

Coorientação: Prof. Lucas Macena Lima da Silva.

1. Proteção adaptativa. 2. Geração distribuída fotovoltaica. 3. OpenDSS. 4. Otimização. 5. Algoritmos. I. Título.

---

CDD 621.3

ARTHUR DA SILVA TORRES

ANÁLISE COMPARATIVA DA IMPLEMENTAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
FOTOVOLTAICA UTILIZANDO O OPENDSS APLICADO À PROTEÇÃO ADAPTATIVA  
DE RELÉS

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)

---

Eng. Lucas Macena Lima da Silva (Coorientador)  
Lumi Tecnologia e Gestão

---

Eng. Luca Macedo Martins  
LAP Engenharia

Aos meus pais, Maria Ozaneide Penha da Silva  
Torres e Francisco José da Silva Torres;  
À minha família;  
A todos os amigos que cultivei ao longo dessa  
jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Ozaneide e Francisco, que sempre zelaram por mim, me educando, me motivando e me amando.

Aos meus familiares e amigos, que por muitas vezes me deram suporte, carinho, e conforto, ajudando a construir momentos tão felizes ao longo dos últimos anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Raimundo Sampaio pelas orientações em meu trabalho de conclusão de curso, junto ao meu coorientador o Eng, Lucas Macena Lima da Silva, que deram direcionamentos e contribuições muito relevantes para o êxito do trabalho com paciência e empatia.

Aos professores, técnicos e assistentes do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo suporte fornecido e os conhecimentos adquiridos durante esse período.

Um agradecimento especial aos meus avós, que estruturaram e guiaram tão bem a família, mesmo com suas simplicidades, sempre intercedendo por todos em suas orações.

“Não existem métodos fáceis para resolver problemas difíceis.”

(René Descartes)

## RESUMO

Frente à crescente penetração de Geração Distribuída (GD) de fontes renováveis, especificamente a fotovoltaica (FV), fez-se necessária a investigação dos desafios impostos à proteção de sistemas elétricos de distribuição no que toca a proteção tradicional desses sistemas. Diante disso, a inserção de geradores baseados em inversores altera significativamente a magnitude e a direção das correntes de curto, comprometendo a seletividade e a coordenação dos esquemas de proteção tradicionais, que são projetados para um fluxo de potência unidirecional. Portanto, para diminuir tais problemas, a proteção adaptativa surge como uma solução promissora, tendo em vista que os ajustes parametrizados no relé, principalmente o que se refere à proteção de sobrecorrente direcional, são atualizados em sincronia às mudanças do sistema. Tendo isso em vista, Sampaio (2022) elaborou o *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm* (AFDBA) e fez validação dele em três redes IEEE. Martins (2024) fez uma análise comparativa entre o AFDBA e outro algoritmos semelhantes propostos na literatura. O presente trabalho prossegue na mesma linha de pesquisa, apresentando uma nova abordagem de simulação das redes de três e oito barras com o OpenDSS, inserindo a geração fotovoltaica em diferentes níveis de penetração, visando verificar o impacto na proteção adaptativa obtida através do AFDBA, que é aplicado para resolver este problema e determinar os ajustes ótimos dos relés de forma dinâmica. Os resultados demonstram a eficácia do AFDBA com Geração Distribuída Fotovoltaica em uma abordagem de proteção adaptativa para duas redes IEEE, comparando os diferentes níveis de penetração FV, com a solução para o sistema simulado no OpenDSS.

**Palavras-chave:** Proteção Adaptativa; Geração Distribuída Fotovoltaica; OpenDSS; Otimização; Algoritmos.

## ABSTRACT

In view of the growing penetration of distributed generation from renewable sources, specifically photovoltaics, it has become necessary to investigate the challenges posed to the protection of electrical distribution systems in terms of their traditional protection. The introduction of inverter-based generators significantly alters the magnitude and direction of short currents, compromising the selectivity and coordination of traditional protection schemes, which are designed for unidirectional power flow. Therefore, to reduce these problems, adaptive protection has emerged as a promising solution, given that the settings parameterized in the relay, especially with regard to directional overcurrent protection, will be updated in sync with changes in the system. With this in mind, Sampaio (2022) developed the *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm* (AFDBA) and validated it in three IEEE networks. Martins (2024) conducted a comparative analysis between AFDBA and other similar algorithms proposed in the literature. The present work continues along the same line of research, presenting a new approach to simulating three- and eight-bus networks with OpenDSS, inserting photovoltaic generation at different penetration levels, aiming to verify the impact on adaptive protection obtained through AFDBA, which is applied to solve this problem and determine the optimal relay settings dynamically. The results demonstrate the effectiveness of AFDBA with Distributed Photovoltaic Generation in an adaptive protection approach for two IEEE networks, comparing the different levels of PV penetration with the solution for the system simulated in OpenDSS.

**Keywords:** Adaptive Protection; Photovoltaic Distributed Generation; OpenDSS; Optimization; Algorithms.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo mundial de Energia. ....	18
Figura 2 – Geração de Energia Elétrica no Mundo por Fonte. ....	18
Figura 3 – Comparação de fontes renováveis e não renováveis para geração de energia entre Brasil e o Mundo. ....	19
Figura 4 – Matriz elétrica brasileira. ....	20
Figura 5 – Aumento de geração de eletricidade no Brasil por tipo de energia. ....	20
Figura 6 – Curva de operação do tipo Normal Inversa. ....	23
Figura 7 – Diagrama Fasorial para condição e quadratura e $\varphi = 45^\circ$ elétricos. ....	25
Figura 8 – Geração Média Horária (MWmed). ....	26
Figura 9 – Circuito equivalente da Célula Fotovoltaica. ....	27
Figura 10 – Curva Característica I-V e Potência para um Módulo de 100Wp. ....	28
Figura 11 – Influência de Fatores na Curva I x V – (a) radiação solar. (b) ....	29
Figura 12 – Falta em sistema de distribuição com GD. ....	31
Figura 13 – Diagrama de impedância. ....	31
Figura 14 – Exemplo linha de comando (a) com interação direta e sem (b) interação direta. .	37
Figura 15 – Topologia da rede IEEE de três barras. ....	46
Figura 16 – Potência de pico de geração FV e Potência demandada ao longo do dia. ....	47
Figura 17 – Tempo de atuação para Rede IEEE três barras com 0% de FV. ....	49
Figura 18 – Tempo de atuação para Rede IEEE três barras com 50% de FV. ....	50
Figura 19 – Tempo de atuação para Rede IEEE três barras com 100% de FV. ....	50
Figura 20 – Topologia da rede IEEE de três barras. ....	51
Figura 21 – Potência de pico de geração FV e Potência demandada ao longo do dia. ....	51
Figura 22 – Tempo de atuação para Rede IEEE oito barras com 0% de FV. ....	56
Figura 23 – Tempo de atuação para Rede IEEE oito barras com 50% de FV. ....	56
Figura 24 – Tempo de atuação para Rede IEEE oito barras com 100% de FV. ....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de curva de operação.....	23
Tabela 2 – Sintaxe do elemento Circuit.....	38
Tabela 3 – Sintaxe do elemento Transformer.....	38
Tabela 4 – Sintaxe do elemento Linecode.....	39
Tabela 5 – Sintaxe do elemento Line.....	39
Tabela 6 – Sintaxe do elemento LoadShape.....	39
Tabela 7 – Sintaxe do elemento Load.....	40
Tabela 8 – Sintaxe do elemento EnergyMeter.....	40
Tabela 9 – Sintaxe do elemento Monitor.....	40
Tabela 10 – Sintaxe do elemento PVSystem.....	41
Tabela 11 – Sintaxe do elemento Solve.....	41
Tabela 12 – Regras Fuzzy utilizadas no AFDBA.....	44
Tabela 13 – Correntes de curto para diferentes níveis de penetração da GD.....	47
Tabela 14 – Valores RTCs para os relés da rede IEEE de três barras.....	48
Tabela 15 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de três barras pelo AFDBA – GDFV 0%.....	48
Tabela 16 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de três barras pelo AFDBA – GDFV 50%.....	48
Tabela 17 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de três barras pelo AFDBA – GDFV 100%.....	49
Tabela 18 – Correntes de curto para diferentes níveis de penetração da GD – Relés Primário.....	52
Tabela 19 – Correntes de curto para diferentes níveis de penetração da GD – Relés de backup.....	53
Tabela 20 – Valores RTCs para os relés da rede IEEE de oito barras.....	53
Tabela 21 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de oito barras pelo AFDBA – GDFV 0%.....	54
Tabela 22 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de oito barras pelo AFDBA – GDFV 50%.....	54
Tabela 23 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de oito barras pelo AFDBA – GDFV 100%.....	55
Tabela 24 – Comparação dos níveis de curto rede IEEE de três barras.....	58
Tabela 25 – Comparação dos níveis de curto rede IEEE de oito barras (a) primário e (b) backup.....	59
Tabela 26 – Comparação dos valores de TAP e DT da rede IEEE de três barras pelo AFDBA – GDFV 0%.....	60
Tabela 27 – Tempo de atuação dos relés para rede de três e oito barras em diferentes níveis de penetração.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GD	Geração Distribuída
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
IA	Inteligência Artificial
SEP	Sistema Elétrico de Potência
ONS	Operador Nacional do Sistema
GDFV	Geração Fotovoltaica
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TAP	Corrente de Atuação
DT	Dial de Tempo
PC	Personal Computer
FV	Fotovoltaico
OPENDSS	Open Distribution System Simulator
AFDBA	Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm
BA	Bat Algorithm
DBA	Directional Bat Algorithm
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
RTC	Relação de Transformação do Transformador de Corrente
TTA	Tempo Total de Atuação dos relés
PRODIST	Procedimento de Distribuição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>15</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>15</i>
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Sistema Elétrico de Potência e a Geração Distribuída.....</b>	<b>17</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Parâmetro a nível mundial.....</i>	<i>17</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Parâmetro a nível nacional.....</i>	<i>19</i>
<b>2.2</b>	<b>Sistema Elétrico de Potência e Proteção.....</b>	<b>21</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Proteção do sistema.....</i>	<i>21</i>
<i>2.2.1.1</i>	<i>Relé de Sobrecorrente Direcional.....</i>	<i>22</i>
<b>2.3</b>	<b>Sistema Fotovoltaico.....</b>	<b>25</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Introdução.....</i>	<i>25</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Inversores.....</i>	<i>27</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Visão matemática.....</i>	<i>27</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Impactos da Geração Distribuída Fotovoltaica.....</i>	<i>29</i>
<i>2.3.4.1</i>	<i>Fluxo de Potência e Regulação de Tensão.....</i>	<i>29</i>
<i>2.3.4.2</i>	<i>Níveis de Corrente de Curto-Circuito.....</i>	<i>30</i>
<b>2.4</b>	<b>OpenDSS.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5</b>	<b>Algoritmo de otimização .....</b>	<b>32</b>
<i>2.5.1</i>	<i>Introdução sobre Inteligência Artificial.....</i>	<i>32</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Lógica Fuzzy.....</i>	<i>33</i>
<i>2.5.3</i>	<i>Algoritmo.....</i>	<i>34</i>
<b>2.6</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
	<b>NESTE TÓPICO SÃO MOSTRADOS A METODOLOGIA DO TRABALHO, APRESENTANDO O <i>SOFTWARE</i> DE SIMULAÇÃO, O ALGORITMO DE ESTUDO E AS REDES IEEE UTILIZADAS.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2</b>	<b>OpenDSS.....</b>	<b>36</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Introdução.....</i>	<i>36</i>

3.2.2	<i>Sintaxe</i> .....	37
3.2.2.1	<i>Definições de comandos</i> .....	37
3.2.2.2	<i>Principais elementos</i> .....	37
3.3	<b>Algoritmo AFDBA de Sampaio (2022)</b> .....	41
3.4	<b>Algoritmo de estudo</b> .....	43
3.4.1	<i>Aplicação no MATLAB</i> .....	45
3.5	<b>Apresentação das redes e Aplicação</b> .....	46
3.5.1	<i>Rede IEEE de três barras</i> .....	46
3.5.2	<i>Rede IEEE de oito barras</i> .....	51
3.6	<b>Considerações finais</b> .....	57
4	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	58
4.1	<b>Níveis de corrente de curto</b> .....	58
4.2	<b>Velocidade de atuação</b> .....	60
4.3	<b>Considerações finais</b> .....	62
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	63
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	65

## 1 INTRODUÇÃO

A integração de Geração Distribuída (GD) ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem seu crescimento evidente diante da série de ganhos que proporcionam, como o aumento de confiabilidade e estabilidade (ABSOLAR, 2024). Somando isso aos interesses políticos e socioeconômicos dos países, é esperado um constante aumento de interesse em sua implementação e, conseqüentemente, seu domínio, onde o maior conhecimento favorece também a hegemonia de seu funcionamento (JENKINS; EKANAYAKE; STRBAC, 2010). Assim, é observado para o Brasil cada vez mais o incentivo desse tipo de geração, impactando um grande mercado especializado, que é necessário para implantação e manutenção dos equipamentos utilizados para o bom funcionamento do SEP.

Por conseguinte, a implementação da Geração Distribuída deve atender às regularidades do sistema e às condições ao qual está inserido. Nesse contexto, as práticas de proteção tornaram-se um ponto chave para cumprimento da disponibilização de energia de qualidade como disposto pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio do Prodist (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), como pode ser observado nos estudos cada vez mais descritivos e profundos de Mamede Filho e Mamede (2022). Nesse sentido, o grande volume de GDs inseridos nas redes, o qual ocasiona fenômenos como a bidirecionalidade do fluxo e a variação na topologia das redes, junto das facilidades computacionais dos últimos anos com a Inteligência Artificial (IA), propiciaram o desenvolvimento de novas soluções para proteger essas redes, como a Proteção Adaptativa.

A proteção adaptativa consiste na capacidade de ajustar automaticamente os parâmetros dos relés de proteção em tempo real, respondendo às novas condições operacionais da rede (SAMPAIO, 2023). Diferentemente dos esquemas de proteção tradicionais, que empregam ajustes fixos e pré-definidos, a proteção adaptativa confere uma flexibilidade substancial ao sistema. Com isso, permitindo que lide eficazmente com fenômenos complexos como as mudanças na magnitude e direção das correntes de curto-circuito, que, em um modelo convencional, exigiriam um novo e custoso estudo de proteção, aumentando o trabalho e os gastos.

Portanto, para compreender e enfrentar os desafios de, por exemplo, a implementação de um sistema fotovoltaico na rede, que pode ocasionar a perda de seletividade e sensibilidade dos dispositivos de proteção, Sampaio (2022) estudou e elaborou através da IA e seus ramos como Lógica *Fuzzy* e Algoritmos Evolutivos, a utilização do *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm (AFDBA)* na coordenação de relés direcionais em redes com GD.

Logo, este estudo adapta duas redes IEEE por meio da inserção de um sistema fotovoltaico com três níveis de penetração, verifica o desempenho da proteção adaptativa através do algoritmo AFDBA, além de simular as novas redes por meio da utilização do *software* OpenDSS, verificando os impactos técnicos da GD.

## 1.1 Objetivos

Neste tópico são apresentados os objetivos do presente trabalho.

### 1.1.1 *Objetivo geral*

Verificar o impacto da inserção de GDFV no desempenho do algoritmo AFDBA em assegurar proteção adaptativa a relés de sobrecorrente direcional.

### 1.1.2 *Objetivos específicos*

Ademais, o presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Modelar a rede de distribuição IEEE de três e oito barras no OpenDSS visando a compreender o impacto da inserção de geração fotovoltaica (FV) nos resultados de simulação dos parâmetros que envolvem a corrente de curto para os diferentes níveis de penetração;
- Implementar o método de otimização de parâmetros de relés direcionais desenvolvido por Sampaio (2022);
- Analisar o impacto no tempo de operação para atuação das proteções com inserção da geração distribuída fotovoltaica.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 1, são apresentados a introdução ao tema, o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho, destacando a relevância da análise dos impactos da geração distribuída fotovoltaica nas redes de distribuição elétrica, bem como o uso do AFDBA para proteção adaptativa;
- No capítulo 2, é traçada a fundamentação teórica, com os seguintes tópicos:

Setor Elétrico e Geração Distribuída, Proteção do Sistema Elétrico de Potência, Impactos da GD na Proteção do SEP, Relé de Sobrecorrente Direcional, apresentação do OpenDSS, Proteção Adaptativa, Inteligência Artificial, Lógica *Fuzzy*, Algoritmo de Otimização;

- No Capítulo 3, é apresentada a sintaxe e linguagem utilizada no *software* OpenDSS, ferramenta escolhida para simulação da rede. Introduzindo sobre a ferramenta e suas estruturas de sintaxe das linhas de código que definem os equipamentos utilizados nesta simulação. Além disso, demonstra o embasamento para a inteligência artificial e o algoritmo utilizado, apresentando os resultados de simulação;
- No capítulo 4, são discutidos e comparados os resultados obtidos, destacando os impactos da geração distribuída fotovoltaica na aplicação do algoritmo AFDBA;
- Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do presente estudo, além de exibir sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo estabelece o embasamento teórico que subsidia esta pesquisa. A exposição tem como ponto de partida o panorama geral da Geração Distribuída no Brasil. Subsequentemente, o foco se desloca para a Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, em que são dissecadas as profundas implicações da inserção da GD, o funcionamento de Relés de Sobrecorrente Direcionais e o novo paradigma da Proteção Adaptativa como resposta aos desafios emergentes. Nesse âmbito, explora-se as ferramentas computacionais mobilizado para o tratamento da problemática, introduzindo os fundamentos da Inteligência Artificial e dos Algoritmos de Otimização, além de descrever a plataforma de simulação OpenDSS, ferramenta central para a fase experimental deste estudo.

### 2.1 Sistema Elétrico de Potência e a Geração Distribuída

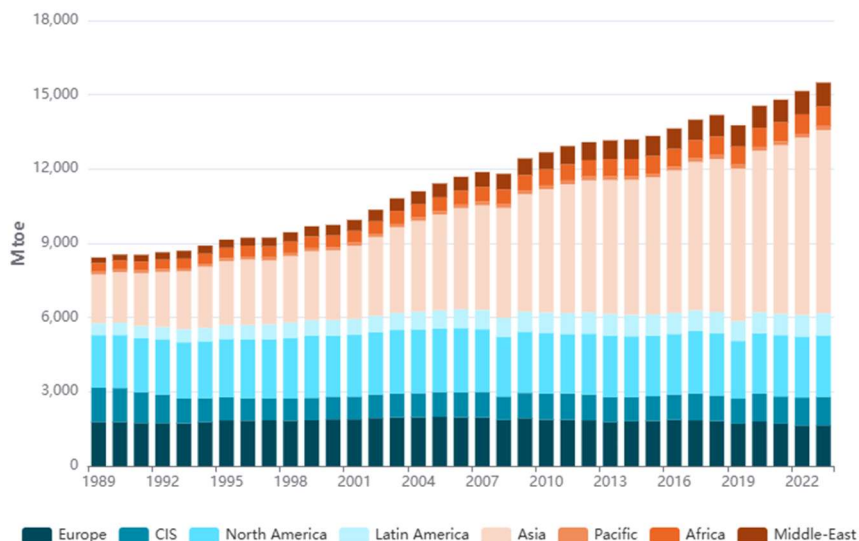
Neste tópico são apresentados uma introdução teórica a nível mundial e nacional do sistema elétrico de potência.

#### 2.1.1 *Parâmetro a nível mundial*

O crescimento populacional e a dependência de recursos que utilizam eletricidade acompanham um crescimento paralelo e bastante crescente, ao passo que se prevê um investimento de US\$ 3,3 trilhões em 2025 em energia para setor elétrico mundial (IEA, 2025). Na Figura 1, observa-se essa tendência, onde o consumo global de energia aumentou 2,2% em 2024.

Disso, outro destaque se dá ao aumento no papel da geração de eletricidade renovável, com abrangência de mercado de em média, 5,4% ao ano na última década, em que a China, os Estados Unidos, a União Europeia, a Índia e o Brasil foram os principais responsáveis em 2023.

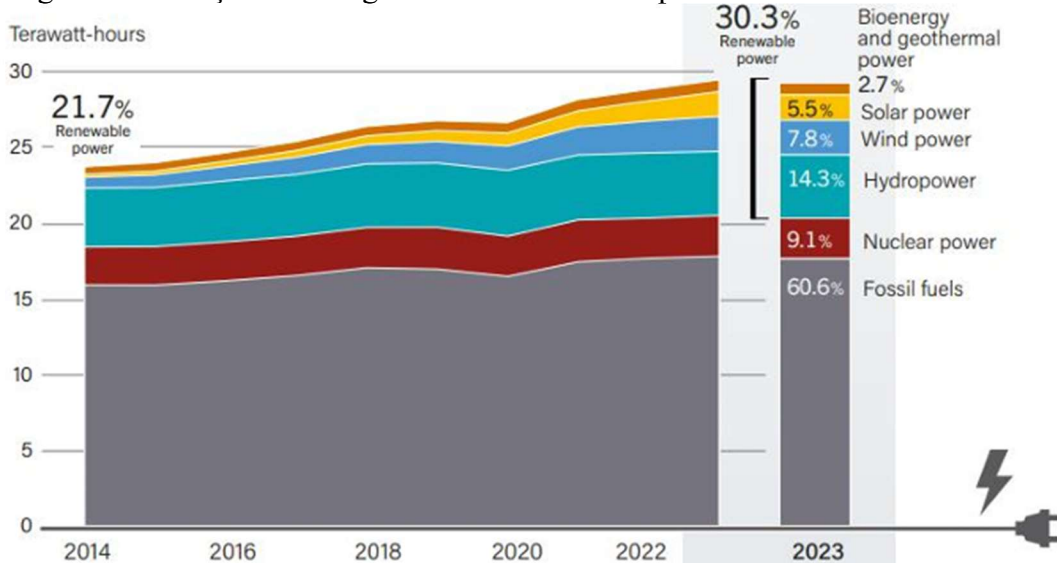
Figura 1 – Consumo mundial de Energia.



Fonte: (ENERDATA, 2024)

Na Figura 2, observa-se a tendência de que fontes renováveis corresponderam a 30,3% do total de energia gerada no mundo, com a energia solar representando 5,5%. O indicativo no quesito mundial é que tamanha demanda está acompanhada de uma variação de fontes de energia, com diversas formas alternativas (Geração Distribuída), apesar da grande participação de fontes fósseis.

Figura 2 – Geração de Energia Elétrica no Mundo por Fonte.

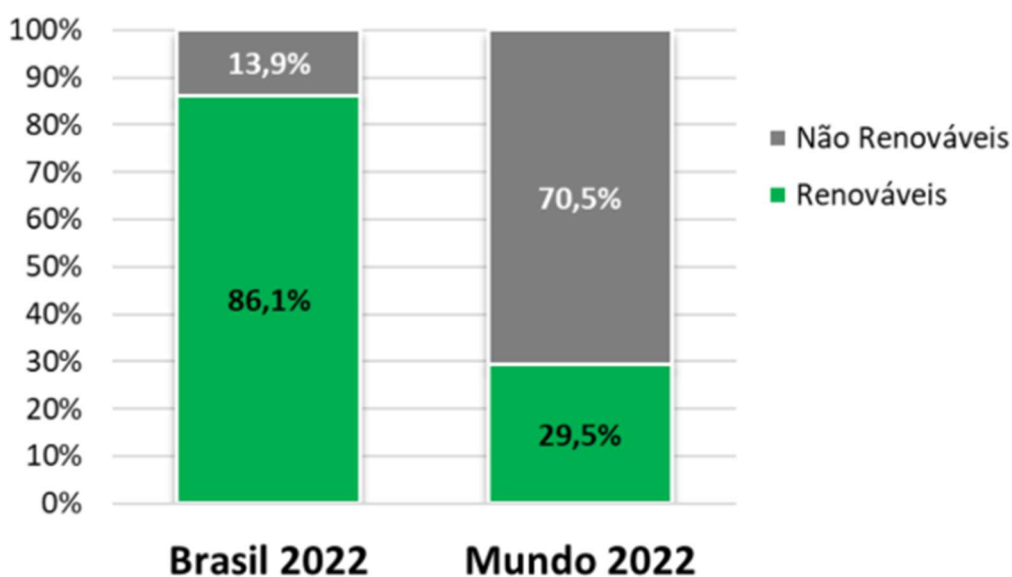


Fonte: (ADIB, 2024)

### 2.1.2 Parâmetro a nível nacional

No Brasil, acompanhando a tendência mundial como um país em desenvolvimento, também apresenta crescimento no consumo de energia elétrica, mas com o diferencial de sua geração ser em maior parte de matrizes renováveis, como observado na Figura 3.

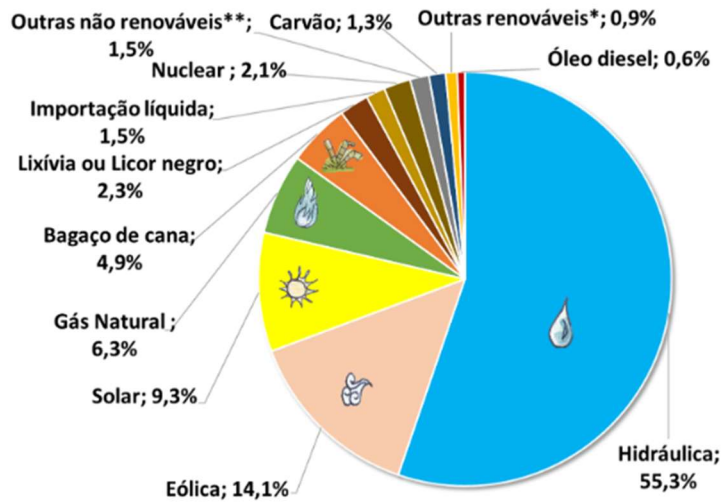
Figura 3 – Comparação de fontes renováveis e não renováveis para geração de energia entre Brasil e o Mundo.



Fonte: (EPE, 2025)

Aprofundando nas energias renováveis utilizadas, a geração distribuída de fonte fotovoltaica se mostra como um vetor de grande potencial para o Brasil, cerca de 9,3% de contribuição segundo a Figura 4. Pois, alavancada pela expressiva disponibilidade de recurso solar no país, a conversão de luz solar em eletricidade posiciona-se como uma opção viável e estratégica, capaz de contribuir simultaneamente para a diversificação da matriz elétrica e para o avanço de uma agenda de desenvolvimento sustentável (EPE, 2024).

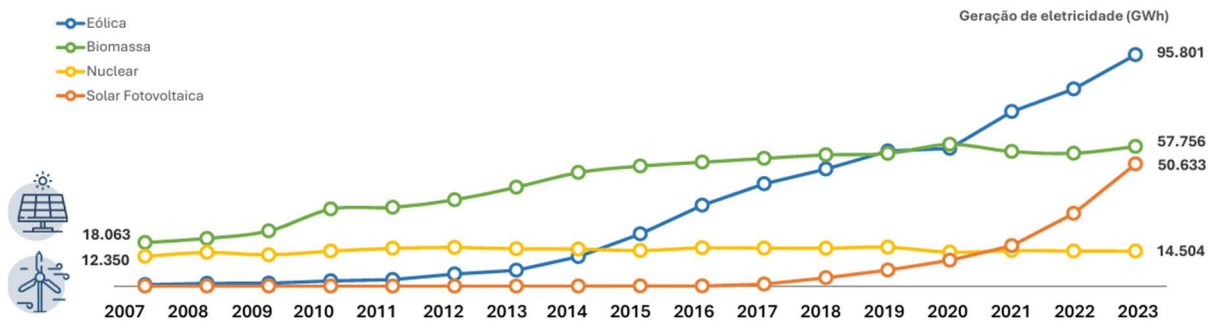
Figura 4 – Matriz elétrica brasileira.



Fonte: (BEN, 2025)

Essa parcela só tende a aumentar, tendo em vista o potencial de crescimento apresentado por essa matriz de energia nos últimos anos, como observado na Figura 5.

Figura 5 – Aumento de geração de eletricidade no Brasil por tipo de energia.



Fonte: (BEN, 2024)

Além disso, a crescente participação de energias renováveis e o aumento da geração distribuída, trazem benefícios ao Sistema Elétrico de Potência, como redução de perdas, aumento de confiabilidade e estabilidade. Em contrapartida, as constantes alterações na topologia da rede devido à natureza estocástica das fontes alternativas de energia e fluxos bidirecionais, ocasionam modificações na direção e na magnitude de curto-circuito da rede (BARRANCO-CARLOS, 2023).

## 2.2 Sistema Elétrico de Potência e Proteção

As dimensões continentais do Brasil impõem desafios únicos à gestão de sua infraestrutura elétrica. O Sistema Elétrico de Potência (SEP) nacional, para atender a uma demanda que vai do âmbito residencial ao industrial, constituiu-se como uma das malhas mais complexas e interligadas globalmente. Assim, a necessidade de integrar fontes de energia diversificadas e, ao mesmo tempo, garantir um suprimento confiável e de qualidade em todo o território, é o que define a magnitude de sua operação.

### 2.2.1 Proteção do sistema

Para compreender os requisitos de confiabilidade e qualidade e proteger a rede, é usual a utilização de diversos equipamentos que seguem uma cadeia funcional e bem definida (MAMEDE FILHO, MAMEDE 2022):

- Unidade de Entrada, onde Transformadores de Corrente (TCs) e de Potencial (TPs) realizam o interfaceamento com a rede de alta potência, convertendo as grandezas elétricas para níveis seguros;
- Internamente ao relé, uma Unidade de Conversão digitaliza esses sinais, que são então processados pela Unidade de Medida;
- Unidade de Medida, executa a lógica de proteção, comparando os valores medidos com os ajustes pré-definidos;
- Ao identificar uma anomalia, a Unidade de Saída do relé emite um comando para a Unidade de Acionamento, uma bobina que efetua a abertura mecânica do disjuntor;
- Para mitigar o máximo possível as falhas na operação, todo o sistema é alimentado por uma Fonte de Tensão Auxiliar, geralmente um banco de baterias, assegurando sua funcionalidade mesmo durante a falha do suprimento principal.

Diante disso, dois elementos chave que permitem não só garantir maior segurança aos equipamentos e a rede, mas também asseguram maior automação do sistema são os relés e disjuntores. Assim, para que um sistema de proteção opere de maneira satisfatória, deve-se atender a um conjunto de requisitos essenciais: a seletividade, que garante a remoção apenas do trecho defeituoso da rede junto ao disjuntor, um objetivo alcançado através da coordenação temporal entre relés e da delimitação de zonas de atuação. Além disso, a performance do sistema é ainda aferida por sua velocidade de resposta, sensibilidade para detectar faltas e confiabilidade

para operar conforme projetado (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022).

A implementação prática desses conceitos leva à distinção entre a proteção primária, que deve ser a primeira a atuar, e a de back-up, que serve de contingência. Por fim, o funcionamento de um relé também é definido por sua Função de Proteção específica, como as de sobrecorrente (ANSI 50/51) ou direcionalidade (ANSI 67), que determinam o tipo de perturbação para a qual o dispositivo está programado para responder.

Observando o tópico 2.1, que aborda a transição para redes elétricas com alta penetração de Geração Distribuída (GD) e expõe as limitações dos esquemas de proteção tradicionais, é constatado que a utilização de relés direcionais, que endereçam a questão do fluxo bidirecional, é insuficiente diante da variabilidade topológica inerente às fontes intermitentes. Nesse contexto, a Proteção Adaptativa sai de um modelo proteção estático para um dinâmico, tendo em vista sua capacidade de autoajuste contínuo (SAMPAIO, 2022).

#### *2.2.1.1 Relé de Sobrecorrente Direcional*

Em sistemas de distribuição com topologia radial sem geração distribuída, onde o fluxo de potência é unidirecional, as funções de proteção de sobrecorrente instantânea (50/50N) e temporizada (51/51N) são suficientes para garantir a proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos. Contudo, em redes com topologia em anel ou com a inserção de GD, a bidirecionalidade do fluxo de corrente invalida a seletividade dessas funções convencionais.

Para superar essa limitação, emprega-se a função de sobrecorrente direcional (67/67N). Este tipo de relé incorpora uma lógica adicional à proteção temporizada: só atuando para faltas que ocorrem em um sentido de fluxo pré-estabelecido. Essa característica permite, conceitualmente, decompor uma rede complexa em múltiplos sistemas radiais virtuais, restaurando a lógica da coordenação (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022).

A sensibilidade à direção é obtida através da comparação fasorial entre uma tensão de polarização e a corrente de operação. Internamente, o relé possui duas unidades distintas: uma unidade de sobrecorrente, que responde à magnitude e duração da falta, e uma unidade direcional, que analisa a relação angular entre tensão e corrente para determinar a direção do fluxo.

De modo geral, para parametrização de relés, o que é usual de se obter é o tempo de atuação do equipamento de acordo com a variação da corrente de curto-circuito. Sendo assim,

para o tempo de atuação ( $t$ ) é necessário definir o tipo de curva de operação de acordo com a norma IEC-60255-3, que define segundo a Tabela 1 as suas constantes.

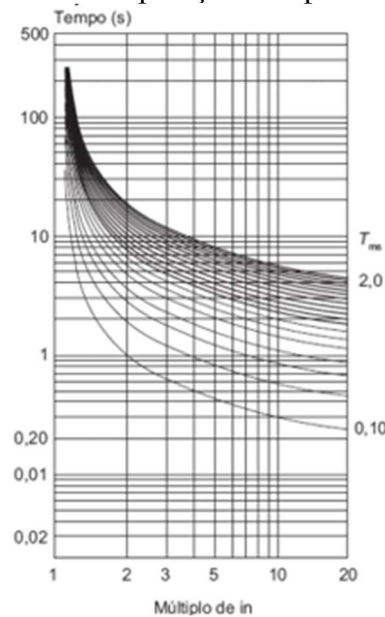
Tabela 1 – Tipos de curva de operação

Tipo de Curva	$\alpha$	$\beta$
Normal Inversa (NI)	0,02	0,14
Muito Inversa (MI)	1	13,5
Extremamente Inversa (EI)	2	80

Fonte: (IEC-60255-3, 2025)

Ao longo do trabalho, foi utilizado a curva Normal Inversa para análise, que tem o comportamento como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Curva de operação do tipo Normal Inversa.



Fonte: (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022)

A equação 1 mostra a expressão para se obter o tempo de atuação dos relés, observa-se que  $\alpha$  e  $\beta$  são as constantes presentes na Tabela 1 e DT o dial de tempo, que define quanto tempo depois da percepção da proteção o relé irá atuar. O múltiplo da corrente de ajuste  $M$ , equação 2 é definido pela razão entre a corrente de curto  $I_{cc}$  e corrente de acionamento de relé  $I_{pk}$  ou corrente de pick-up. Mas também, o  $M$  pode ser obtido através da razão da corrente de falha sobre o  $TAP$ , que define em termos de corrente, quando o relé deve começar a atuar.

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

$$M = \frac{I_{cc}}{I_{pk}} \quad (2)$$

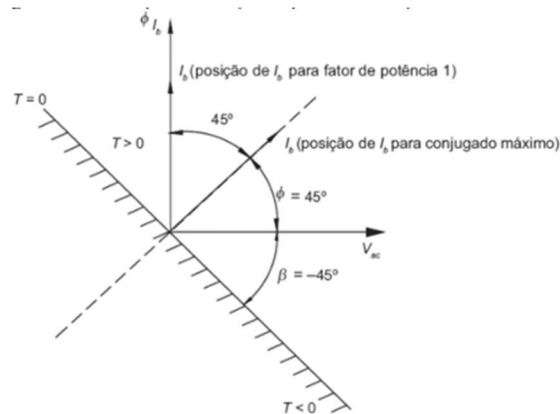
A seletividade direcional de um relé é fundamentada na análise do torque eletromecânico que resulta da interação fasorial entre a tensão de polarização e a corrente de operação, aplicadas às suas respectivas bobinas. A modelagem matemática desse fenômeno é formalizada pela Equação (3), conforme apresentado por Mamede Filho e Mamede (2022).

$$T = K \times V_{bt} \times I_{bc} \times \cos (\varphi - \theta) \quad (3)$$

- $T$  é o torque gerado pela interação entre a tensão de polarização e a corrente de operação que circulam nas bobinas de tensão da e corrente;
- $K$  é a constante de multiplicação;
- $\varphi - \theta$  é a diferença entre o ângulo máximo do torque e o ângulo de defasagem entre  $V_{bt}$  e a corrente de carga.

A representação gráfica dessa equação, ilustrada na Figura 7, revela a existência de uma linha de torque nulo, que atua como o limiar operacional do dispositivo. Essa linha define duas regiões distintas no plano complexo: uma de atuação (tipicamente para  $T < 0$ ) e outra de restrição ou não atuação (para  $T > 0$ ). Logo, a emissão de um sinal de disparo (*trip*) para o disjuntor só ocorre se o fasor da corrente de falta se enquadrar na zona de operação pré-definida. Para os propósitos desta análise, adota-se a conexão em quadratura e um ângulo de torque máximo ( $\varphi$ ) de  $45^\circ$ , configurações que são amplamente utilizadas na prática e garantem uma resposta otimizada do relé.

Figura 7 – Diagrama Fasorial para condição e quadratura e  $\varphi = 45^\circ$  elétricos.



Fonte: (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2022)

## 2.3 Sistema Fotovoltaico

Neste tópico são abordados conceitos introdutórios sobre o sistema fotovoltaico.

### 2.3.1 Introdução

A operação de uma célula fotovoltaica é governada pelos princípios da física de semicondutores. Diante disso, o princípio de semicondutores é tomado pelo tipo material a partir de sua estrutura eletrônica, caracterizada por uma banda de valência e uma de condução, separadas por um *gap* de energia. Assim, a absorção de um fóton com energia suficiente promove um elétron da banda de valência para a de condução, gerando simultaneamente um elétron livre e uma lacuna, que funcionam como portadores de carga móveis (PINHO; GALDINO, 2014).

Isoladamente, a geração desses pares não resulta em uma corrente elétrica líquida. A funcionalidade da célula fotovoltaica depende da criação de uma junção PN, uma interface entre uma região dopada com excesso de elétrons (tipo n) e outra com falta de elétrons (tipo p). Com isso, a junção estabelece uma zona de depleção e, conseqüentemente, um campo elétrico interno permanente. Logo, é este campo que desempenha o papel crucial de separar os pares elétron-lacuna gerados pela luz solar, direcionando os elétrons para o lado n e as lacunas para o lado p.

Este processo de separação de cargas pelo campo elétrico da junção PN é a essência

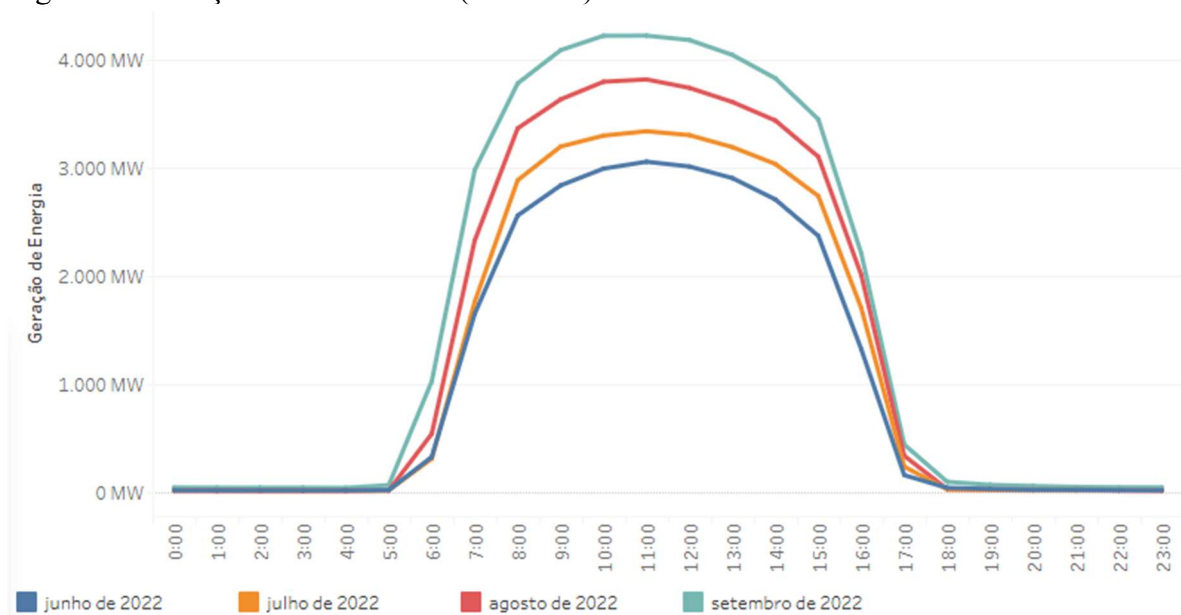
do efeito fotovoltaico, descoberto por Bequerel em 1839, pois resulta no acúmulo de cargas opostas nos terminais do dispositivo, gerando uma diferença de potencial (tensão) e uma corrente elétrica quando conectado a um circuito externo. Materiais como silício e arseneto de gálio são amplamente utilizados para fabricar essas estruturas (BENEDITO; MACEDO; ZILLES, 2008).

A energia solar tem sua base em reações de fusão termonuclear que ocorrem no núcleo do Sol, onde núcleos de hidrogênio se combinam para formar hélio, liberando uma quantidade massiva de energia (BENEDITO; MACEDO; ZILLES, 2008). Essa energia propaga-se até a superfície solar e é emitida para o espaço sob a forma de radiação eletromagnética, composta por fótons que viajam à velocidade da luz. Ao atingir a Terra, essa radiação manifesta-se como um recurso energético de grande valor, especialmente para o Brasil.

Devido à sua localização geográfica privilegiada, próxima à linha do Equador, o território brasileiro é agraciado com elevados índices de irradiância solar. Essa condição natural confere ao país um expressivo potencial para o aproveitamento desta energia, tanto por meio da geração fotovoltaica quanto por processos térmicos.

Demonstrando dependência da energia solar, na Figura 8 é apresentado o comportamento de geração fotovoltaica, onde observa-se os picos de produção nos horários de maior incidência do sol ao longo dos meses de junho a setembro de 2022.

Figura 8 – Geração Média Horária (MWmed).



Fonte: (ONS, 2022)

### 2.3.2 Inversores

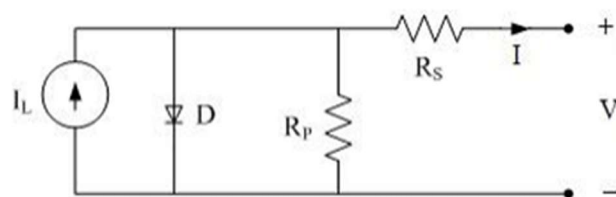
O inversor fotovoltaico é o dispositivo de eletrônica de potência que viabiliza a integração da geração solar à rede elétrica, executando a conversão de corrente contínua para corrente alternada (PINHO; GALDINO, 2014). Diante disso, esse processo é viabilizado por uma arquitetura de chaveamento de alta frequência, baseada em semicondutores, que manipula a tensão de corrente contínua (CC) para gerar uma forma de onda alternada (RODRÍGUEZ, 2002).

Além do papel de conversão do inversor, esse dispositivo garante a qualidade da energia injetada no sistema, tendo em vista que a qualidade desta conversão é crítica, é preciso de uma estratégia de chaveamento para determinar a forma de onda de saída quadrada, retangular ou senoidal. Essas ondas variam em níveis de distorção harmônica, eficiência e custo (PINHO; GALDINO, 2014).

### 2.3.3 Visão matemática

Segundo Pinho e Galdino (2014), a partir dos parâmetros construtivos dos módulos FV, são definidas as grandezas elétricas atribuídas ao sistema, como: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e eficiência.

Figura 9 – Circuito equivalente da Célula Fotovoltaica.



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

A corrente  $I$  presente na Figura 9 pode ser calculada, segundo Pinho e Galdino (2014):

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q*V}{n*K*T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

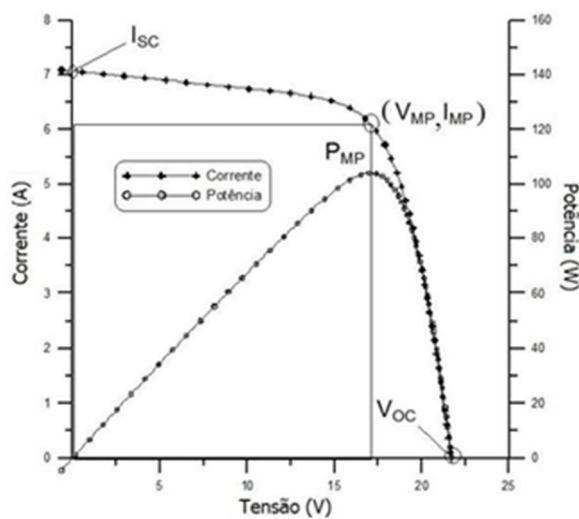
Onde:

- $I_L$  é a corrente fotogerada em Amperes;
- $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo em Amperes;

- $n$  é fator de idealidade do diodo;
- $q$  é a carga do elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);
- $K$  é a Constante de Boltzman ( $1,6 \times 10^{-23}$  J/K);
- $T$  é a temperatura absoluta em Kelvin.

A Figura 10 apresenta a caracterização do desempenho elétrico de uma célula ou módulo fotovoltaico é realizado sob Condições Padrão de Teste (STC – *Standard Test Conditions*), que prescrevem uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e uma temperatura de célula de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  para garantir a comparabilidade dos resultados. Nestas condições normalizadas, o método mais abrangente para a análise consiste no levantamento da curva característica Corrente-Tensão (I-V), que mapeia a resposta do dispositivo (PINHO; GALDINO, 2014). A partir de cada par de pontos (V, I) desta curva, a potência instantânea é determinada pela relação fundamental  $P = V \times I$ , permitindo a construção da curva Potência-Tensão (P-V) correspondente.

Figura 10 – Curva Característica I-V e Potência para um Módulo de 100Wp.

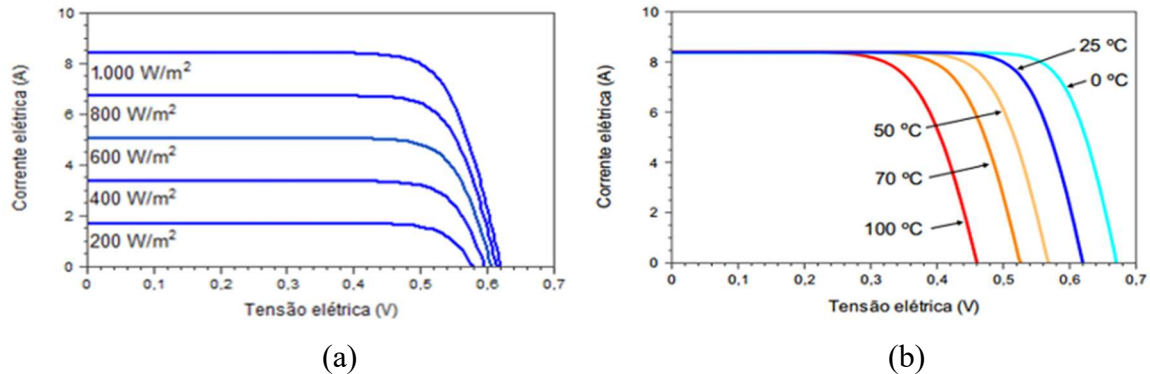


Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

A curva característica de um dispositivo fotovoltaico é definida por parâmetros elétricos chave, incluindo: a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ), a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e o ponto de máxima potência ( $P_{MP}$ ), este último determinado pela corrente ( $I_{MP}$ ) e tensão ( $V_{MP}$ ) (corrente e tensão no ponto de máxima da potência). É fundamental notar que esta curva não é estática, pois seu formato é fortemente dependente das condições operacionais, notadamente a irradiância solar e a temperatura da célula, uma vez que estas variáveis ambientais influenciam diretamente os valores de  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$ .

Observa-se na Figura 11 (a) que a corrente elétrica do módulo fotovoltaico cresce à medida que a irradiância solar aumenta, sendo um aumento linear quando se trata da corrente de curto-circuito. Já na Figura 11 (b), observa-se a influência na curva de corrente e tensão e a temperatura da célula (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 11 – Influência de Fatores na Curva I x V – (a) radiação solar. (b) temperatura da célula.



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

### 2.3.4 Impactos da Geração Distribuída Fotovoltaica

A inserção de geração distribuída fotovoltaica gera impactos no sistema ao qual está conectada. Neste tópico são apresentadas as principais consequências dessa inserção.

#### 2.3.4.1 Fluxo de Potência e Regulação de Tensão

Os sistemas elétricos de distribuição foram historicamente projetados para operar com um fluxo de potência unidirecional, partindo das subestações em direção às cargas dos consumidores (ESSLINGER; WITZMANN, 2010). Sendo assim, a inserção da Geração Distribuída, como a fotovoltaica, subverte essa premissa fundamental ao introduzir a possibilidade de um fluxo de potência reverso. Este fenômeno ocorre quando a potência injetada pelos geradores locais excede a demanda da carga, fazendo que a energia flua no sentido contrário ao convencional (PALUDO, 2014). A magnitude e a direção do fluxo de potência em qualquer ponto da rede passam a ser uma função da interação entre a geração da subestação, a injeção da GD e a carga, conforme as leis de Kirchhoff.

Essa alteração no fluxo de potência gera dois impactos primordiais na operação da rede:

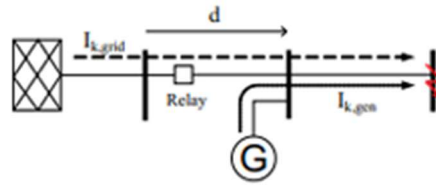
- Na Regulação de Tensão: Em uma rede radial tradicional, os níveis de tensão decrescem naturalmente com a distância da subestação (ESSLINGER; WITZMANN, 2010). A injeção de potência pela GD contraria essa tendência, podendo causar uma elevação da tensão no ponto de conexão e tornando o perfil de tensão ao longo do alimentador menos previsível. Os Reguladores de Tensão com Comutador (SVRs), dispositivos que ajustam a tensão por meio de *taps*, podem ter sua lógica de controle, como o método de Compensação de Queda de Linha (LDC), comprometida pelo fluxo reverso, pois a suposição fundamental do LDC (tensão caindo com o fluxo) não se aplica mais. O SVR precisa ser capaz de identificar a direção do fluxo de energia para alternar entre as lógicas de compensação de queda e de aumento de tensão, exigindo equipamentos com capacidade de operação bidirecional para funcionar corretamente.
- Na Proteção do Sistema: O fluxo reverso também impõe um desafio crítico ao sistema de proteção. Conforme apontado por Katiraei e Agüero (2011), a inversão do sentido da corrente de falta pode comprometer a seletividade e a coordenação dos dispositivos de proteção, como relés e disjuntores, exigindo uma reavaliação completa de sua adequação para garantir a confiabilidade da rede.

#### 2.3.4.2 Níveis de Corrente de Curto-Circuito

Para a proteção de sistemas, a alteração nos níveis de curto do alimentador e a conexão de pequenos geradores, impactam diretamente na seletividade e detecção de faltas no sistema de proteção, podendo afetar a sensibilidade das proteções devido ao impacto de sinal de *trip* nos equipamentos, falta de coordenação com disjuntores, fusíveis ou religadores (MAMEDE FILHO, MAMEDE, 2022). Com isso, quando uma falta ocorre em uma rede com Geração Distribuída, como esquematizado na Figura 12, o ponto defeituoso passa a ser alimentado tanto pela fonte principal quanto pela GD. A corrente de falta total é, portanto, uma superposição dessas duas contribuições.

A capacidade de contribuição da GD, contudo, varia com a tecnologia; sistemas interfaceados por inversor, como o fotovoltaico, apresentam uma contribuição de curta duração e magnitude controlada (COSTER; MYRZIK; KLING, 2010).

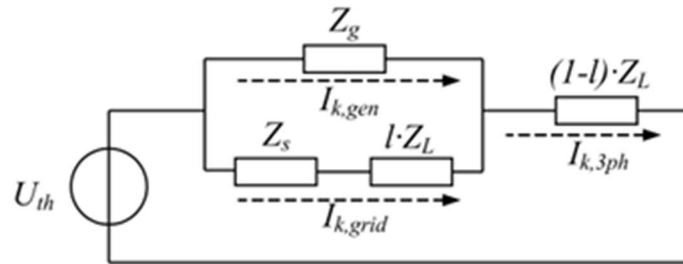
Figura 12 – Falta em sistema de distribuição com GD.



Fonte: (COSTER; MYRZIK; KLING, 2010)

Para determinar a contribuição individual de cada fonte, o sistema pode ser simplificado por meio de seu equivalente de Thévenin, conforme ilustrado na Figura 13. Este circuito modelo representa as impedâncias da fonte principal ( $Z_S$ ), do gerador ( $Z_g$ ) e da linha ( $Z_L$ ), fornecendo a base para o cálculo preciso das correntes de curto-circuito que fluem de cada lado do sistema em direção à falta.

Figura 13 – Diagrama de impedância.



Fonte: (COSTER; MYRZIK; KLING, 2010)

Segundo Coster, Myrzik e Kling (2010), a equação de corrente de curto e as contribuições da rede e gerador resultantes da análise da Figura 13 estão dispostas nas equações (5) e (6):

$$I_{k,3ph} = \frac{U_{TH} * (Z_g + l * Z_L + Z_s)}{\sqrt{3} * [(Z_L * Z_g + Z_s * Z_g + Z_s * Z_L) + l * Z_L * (Z_L - Z_s) - l^2 * Z_L^2]} \quad (5)$$

$$I_{k,grid} = \frac{Z_g}{(Z_g + Z_L + Z_s)} * I_{k,3ph} \quad (6)$$

## 2.4 OpenDSS

O *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) é uma ferramenta abrangente de simulação para sistemas elétricos, com foco particular em redes de distribuição de energia. Sua concepção é para dar suporte ao crescente mercado de Geração Distribuída, tornando-se uma solução flexível e completa para a análise de sistemas elétricos e da GD.

Uma das possibilidades do *software* é analisar os impactos e a interação da geração

distribuída fotovoltaica em sistemas de distribuição de energia em média tensão, através de modelagens e simulações. Sendo utilizado para estudar o comportamento de parâmetros e fenômenos elétricos no circuito sob diferentes níveis de penetração fotovoltaica, abaixo, igual ou superior às cargas demandadas.

As principais análises que o OpenDSS permite realizar incluem:

- **Análise de Fluxo de Potência:** Essencial para entender como a energia flui através da rede. Isso inclui a avaliação do fluxo de potência na saída da subestação de distribuição (SED), que pode ser afetado e até revertido pela injeção de potência da GD;
- **Qualidade da Energia Elétrica:** Avalia indicadores qualitativos da energia, como o nível de tensão ao longo do circuito, fator de potência (FP) e perdas técnicas do sistema. Por exemplo, permite verificar se os níveis de tensão estão dentro das faixas regulatórias estabelecidas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica);
- **Estudos de Curto-Circuito:** Analisa os novos níveis de correntes de curto-circuito (trifásico, bifásico e monofásico) em cada barra do sistema. A presença da GD modifica a magnitude e direção das correntes de falta na rede;
- **Perdas Técnicas:** Calcula as perdas elétricas totais do circuito, incluindo perdas nas linhas e nos transformadores.

Devido à sua natureza de código aberto, o OpenDSS está em constante atualização e recebe contribuições de desenvolvedores, pesquisadores acadêmicos e profissionais, permitindo que acompanhe o surgimento de novas tecnologias e desafios. Com isso, torna-se uma ferramenta fundamental para estudos de impacto da GD.

## **2.5 Algoritmo de otimização**

Neste tópico são abordados conceitos fundamentais para o entendimento sobre o algoritmo de otimização.

### ***2.5.1 Introdução sobre Inteligência Artificial***

A proteção adaptativa utiliza-se de inteligência artificial e algoritmos de otimização, pois a alta necessidade de adaptação em sincronia às mudanças na rede, traz consigo a

dependência de um poder de processamento de dados de forma mais dinâmica, paralela e interligada. Portanto, é necessário a utilização de sistemas inteligentes, como a Inteligência Artificial (IA), que pode ser definida como o ramo da ciência da computação dedicado ao desenvolvimento de sistemas capazes de realizar tarefas que normalmente exigiriam inteligência humana.

Para o desenvolvimento de uma IA, foram desenvolvidas diversas vertentes de análises, com destaque para três abordagens principais: Sistemas Especialistas, Lógica Difusa e Algoritmos Evolutivos (NEGNEVITSKY, 2005). Os Sistemas Especialistas emulam o raciocínio humano por meio de bases de conhecimento e regras predefinidas. A Lógica Difusa (*Fuzzy*) oferece um ferramental para lidar com a incerteza, permitindo que o sistema processe informações vagas e qualitativas. Os Algoritmos Evolutivos se baseiam na Teoria da Evolução de Darwin, em que a sobrevivência dos indivíduos ao longo de gerações depende da sua capacidade de adaptação, sobrevivendo os que melhor se adequam aos desafios do ambiente, evoluindo a cada geração.

### 2.5.2 *Lógica Fuzzy*

Um problema comum da lógica booleana, usada em sistemas digitais, é sua limitação aos valores lógicos de 1 para verdadeiro e 0 para falso, que não permitem “detalhamento” da informação em outros tipos de sistemas, que não os digitais. Um dos meios de contornar essa problemática é por meio da utilização da Lógica *Fuzzy*, pois expande o espectro do dado, permitindo o “detalhamento” da informação, que antes era binária. Assim, o que a lógica difusa faz é adentrar nas partições existentes entre os números 1 e 0, ou seja, 0,5, 0,75, 0,82... Atribuindo um peso a cada valor e permitindo que os dados que antes poderiam ser somente verdadeiros ou falsos, tenham outros graus de pertinência.

Para implementação computacional da lógica *fuzzy*, o dado passa pelo sistema de inferência que, segundo Negnevitsky (2005), segue:

- *Fuzzyficação*: etapa de atribuição do grau de pertinência às variáveis de entrada;
- Regras de causa e consequência: correlaciona as variáveis de entrada e saída aos grupos *fuzzy* definidos pelo grau de pertinência na etapa de *fuzzyficação*;
- 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;

- *Defuzzyficação*: atribui a cada saída um valor numérico.

### 2.5.3 Algoritmo

De modo geral, o que a proteção adaptativa necessita é um problema de estratégia combinatória, que vai averiguar os caminhos mais promissores, no caso, as parametrizações do relé, para tomar a decisão de atuar ou não as proteções. Para isso, é necessário a utilização de algoritmos que são desenvolvidos sob os conhecimentos apresentados nos tópicos 2.5.1 e 2.5.2.

A abordagem computacional para lidar com essa problemática consiste no uso de algoritmos baseados em heurísticas. Uma heurística é um princípio ou regra que guia o processo de busca, permitindo a identificação e a eliminação de caminhos não promissores de forma eficiente, o que reduz drasticamente o espaço de soluções a serem avaliadas (LUGER; STUBBLEFIELD, 1997). A Inteligência Artificial potencializa essa abordagem, pois técnicas como Sistemas Especialistas, Algoritmos Evolutivos e Lógica *Fuzzy* são empregadas para construir heurísticas sofisticadas, conferindo ao algoritmo uma capacidade análoga à intuição para direcionar a busca por soluções otimizadas.

Neste contexto, é relevante distinguir os algoritmos heurísticos dos meta-heurísticos. Enquanto os primeiros são altamente especializados para um problema particular, os meta-heurísticos são estruturas de otimização mais genéricas e flexíveis, aplicáveis a uma ampla gama de problemas. Embora um algoritmo puramente heurístico possa ter um desempenho superior em sua tarefa específica, a flexibilidade dos meta-heurísticos os torna uma ferramenta poderosa e amplamente utilizada em problemas de engenharia como o da proteção adaptativa.

Por conseguinte, foi utilizado o algoritmo de estudo de Sampaio (2022), que tem 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), em que desenvolveram o *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm* (AFDBA), o qual foi testado e validado em redes de 3, 9 e 30 barras.

Diante disso, por meio de algoritmos inteligentes, o sistema pode recalcular e atualizar os parâmetros dos relés sempre que uma mudança operacional é detectada, como a conexão ou desconexão de um gerador (GUTIERREZ-ROJAS, 2020). Essa capacidade de reconfiguração automática confere uma flexibilidade sem precedentes, adequando-se a alterações na magnitude e direção das correntes de falta sem a necessidade de intervenção humana e novos estudos de proteção (ABDELHAMID et al., 2022).

## 2.6 Considerações finais

Este capítulo estabeleceu o embasamento teórico presente na pesquisa. Sendo apresentado o cenário da distribuição de energia no Brasil, as características da geração fotovoltaica, a interação entre a rede de distribuição e a Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) e seus impactos significativos, especialmente no que tange ao fluxo de potência e corrente de curto. Em paralelo, foram explorados os paradigmas da Proteção Adaptativa e da Inteligência Artificial com os algoritmos. Logo, o conjunto de informações tornam-se fundamentais para a subsequente implementação da rede IEEE de 3 e 8 barras com inserção de GDFV através do OpenDSS, avaliando o impacto na proteção adaptativa com o algoritmo AFDBA.

### 3 METODOLOGIA

Neste tópico são mostrados a metodologia do trabalho, apresentando o *software* de simulação, o algoritmo de estudo e as redes IEEE utilizadas.

#### 3.1 Introdução

Frente ao exposto na fundamentação teórica, a metodologia deste trabalho consiste na apresentação e implementação das Redes no OpenDSS, usado para obtenção das correntes de curto-circuito para diferentes tipos de penetração da GD na rede.

Em seguida, é demonstrado o funcionamento do AFDBA elaborado por Sampaio (2022), a implementação do algoritmo por meio do MATLAB e por fim, é realizada a validação dos parâmetros retornados, de modo a investigar se as condições de restrição impostas foram acatadas.

#### 3.2 OpenDSS

##### 3.2.1 Introdução

Como introduzido no tópico 2.4, o *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) é uma ferramenta abrangente de simulação para sistemas elétricos, com foco particular em redes de distribuição de energia. Uma utilidade é no suporte ao crescente mercado de Geração Distribuída, tornando-se uma solução flexível e completa para a análise de sistemas elétricos e da GD.

O *software* utiliza de um script próprio, que apresenta diferentes classes de elementos em sua sintaxe, são segundo Dugan; Montenegro (2018):

- Barra: são criadas de forma dinâmica ao inserir elementos que contemplam a rede. São nessas barras onde os nós irão estar contidos para serem conectados os elementos elétricos da rede;
- Elementos de transporte de energia: capacitores, transformadores, reatores e linhas;
- Elementos de conversão: geradores e cargas;
- Elementos de suporte: facilitam a definição de parâmetros a serem usados na sintaxe, como o *linecode*, onde é possível definir parâmetros de

condutores;

- Terminais: pontos de conexão.

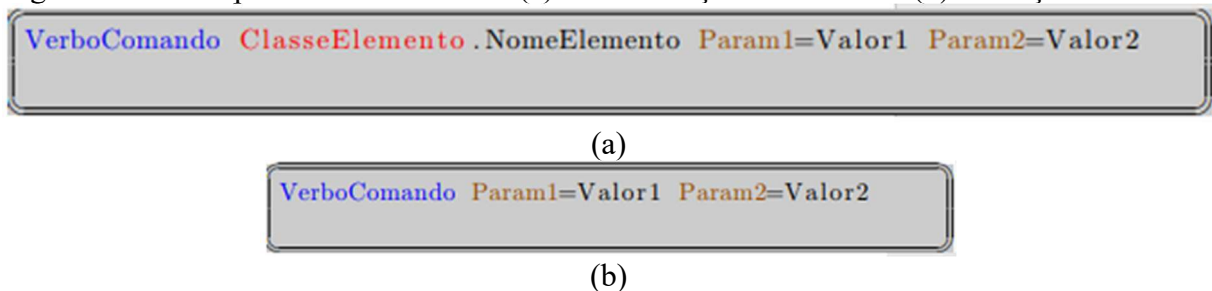
### 3.2.2 *Sintaxe*

Neste tópico são apresentadas as principais observações sobre a sintaxe da linguagem de programação utilizada pelo OpenDSS.

#### 3.2.2.1 *Definições de comandos*

Segundo Sexauer (2016), a sintaxe do OpenDSS é composta por comandos que seguem o modelo Verbo-Parâmetro como mostrado na Figura 14, onde o verbo inicia a ação executada na linha de comando.

Figura 14 – Exemplo linha de comando (a) com interação direta e sem (b) interação direta.



Fonte: (SEXAUER, 2016)

Observa-se na Figura 14 exemplos genéricos da sintaxe dos comandos, que se diferenciam por sua interação com os elementos, onde (a) é para definição de elementos ativos que exigem parâmetros, já em (b) não tem interação com nenhum elemento, geralmente usados para configurações de modo de solução ou definições de resultados.

#### 3.2.2.2 *Principais elementos*

- Circuit: É a rede externa que define a barra de referência.

Tabela 2 – Sintaxe do elemento Circuit.

<p>New circuit.Nome bus1= barra de conexão basekv= tensão da barra  baseMVA= potência de base phases= número de fases R1= resistência de  sequência positiva X1= Reatância de sequência positiva R0= resistência  de sequência zero X0= Reatância de sequência zero</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao longo do trabalho foi usada a tensão de barra de 13,8 kV, resistências e reatâncias definidas de modo a obter um resultado plausível com o observado na literatura.

- Transformer: modela transformadores a partir de dois enrolamentos sendo variações de ligações estrela ou delta.

Tabela 3 – Sintaxe do elemento Transformer.

<p>New transformer.Nome xhl=valor da indutância de dispersão windings=  número de enrolamentos %loadloss= valor da resistência do  enrolamento %noloadloss= valor de perdas em vazios %imag= valor da  corrente de magnetização maxtap= valor do Tap máximo do  transformador mintap= valor do Tap mínimo do transformador  ~ wdg=1 bus= barra primária kv= valor de tensão no primário kva=  valor de potência conn= tipo de ligação  ~ wdg=2 bus= barra secundária kv= valor de tensão no secundário kva=  valor de potência conn=tipo de ligação tap= valor de Tap</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Linecode: usado na definição dos parâmetros elétricos de tipos de linhas, inclusive definir conexões e comprimentos de linhas.

Tabela 4 – Sintaxe do elemento Linecode.

<p>New Linecode.Nome nphases=número de fases basefreq= frequência  units= unidade de extensão do cabo  ~ r1= resistência de sequência positiva x1= reatância de sequência  positiva  ~ r0= resistência de sequência zero x0= reatância de sequência zero</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Line: usado para inserir trechos de linhas elétricas no circuito.

Tabela 5 – Sintaxe do elemento Line.

<p>New line.Nome phases=número de fases bus1= barra do terminal 1  bus2= barra do terminal 2 length= comprimento da linha units= unidade  de comprimento linecode= características do lncode (puxa os  parâmetros)</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

- LoadShape: utiliza-se para definição de curvas de cargas.

Tabela 6 – Sintaxe do elemento LoadShape.

<p>New Loadshape.Nome npts= número de pontos da curva interval=  intervalo de pontos  ~mult=(Npontos)</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

A variável mult pode ser definida como grandeza de potência ativa (ficando Pmult) ou reativa (Qmult).

- Load: utiliza-se para definição de parâmetros das cargas. Dentro do elemento, existem diferentes modelos de carga que afetam a maneira como a carga deve variar com a tensão.

Tabela 7 – Sintaxe do elemento Load.

<p>New Load.Nome bus1= barra de conexão da carga kv= tensão da carga kva= potência da carga pf= fator de potência daily= configurações do loadshape</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda é possível definir as fases com o acréscimo de “Phases” e conexão entre fases de carga com o “Conn”, quando não definidas, acompanham o número de fases do sistema conectado e a conexão em Y.

- EnergyMeter: usado para obter medições de terminais do circuito.

Tabela 8 – Sintaxe do elemento EnergyMeter.

<p>New EnergyMeter.Nome element= nome elemento associado terminal= terminal de conexão</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Monitor: elemento utilizado na medição de grandezas elétricas em que suas amostras de medição são referentes apenas ao ponto do circuito onde o elemento está conectado.

Tabela 9 – Sintaxe do elemento Monitor.

<p>New Monitor.Nome element= elemento associado terminal= terminal de conexão mode=modo de medição ppolar= define se valores são em polares ou retangulares</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

- PVSystem: elemento do gerador fotovoltaico.

Tabela 10 – Sintaxe do elemento PVSystem.

<p>New pvsystem.Nome bus1= barra de conexão basefreq= frequência base          phases= número de fases irradiance= valor irradiance pf= fator de          potência kva= potência do inversor pmpp= potência de pico kv= tensão          de operação daily= vetor de irradiância em cada instante Tdaily= vetor          de temperatura em cada instante</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Solve: elemento que vai resolver os parâmetros.

Tabela 11 – Sintaxe do elemento Solve.

<p>set maxiterations= número de interações mode= modo de solução          adotado setpsize= passo temporal das simulações number= último passo          a ser considerado</p> <p>Solve</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo autor.

O *software* ainda conta com as configurações de plotagem, que não foi preciso para este estudo, visto que o essencial para os testes de proteção adaptativa são os valores de corrente de curto.

### 3.3 Algoritmo AFDBA de Sampaio (2022)

O *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm* se baseia na implementação da Lógica *Fuzzy* para definição dos parâmetros de entrada do *Directional Bat Algorithm* (DBA).

O Algoritmo Morcego (BA), desenvolvido por Yang (2010), tem como princípio fundamental traduzir a busca por presas em um processo de otimização para encontrar a solução de um problema. Inicia-se com uma população de  $n$  soluções candidatas, ou "morcegos", aleatoriamente distribuídas no espaço de busca. Cada morcego é caracterizado por uma posição, uma velocidade e uma frequência de pulso. Assim, o processo iterativo de busca é governado por um conjunto de equações que atualizam essas variáveis. A frequência é ajustada aleatoriamente (7), e a velocidade é atualizada de forma a direcionar o morcego para a melhor solução global  $x^*$  encontrada até então (8). A nova posição é então calculada com base na

velocidade atualizada (9).

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \times aleat \quad (7)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x^*) \times f_i \quad (8)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (9)$$

O termo  $x^*$  é a posição do morcego que minimiza (ou maximiza) uma função objetivo  $F(x_i)$ , servindo como um guia para o resto da população. Essa mecânica permite que o algoritmo explore o espaço de soluções de forma ampla, ao mesmo tempo em que explora intensivamente as regiões mais promissoras, mimetizando a estratégia de busca dos morcegos.

$$x_{nova} = x_{velha} + \varepsilon \cdot A^t \quad (10)$$

Além do "voo" global, o Algoritmo Morcego realiza uma busca local para refinar as soluções. Isso é feito gerando uma nova posição na vizinhança da atual, a qual só é aceita se for uma melhoria (Equação 10). Para equilibrar a busca ampla (exploração) e o refinamento (explotação), o algoritmo ajusta dinamicamente dois parâmetros: a amplitude do sinal ( $A_i$ ) diminui e a taxa de emissão ( $r_i$ ) aumenta conforme melhores soluções são encontradas (Equações 11 e 12). Esse mecanismo imita um morcego se aproximando de sua presa, permitindo que o algoritmo convirja de forma mais eficiente para a solução ótima.

$$A_i^{t+1} = \alpha \cdot A_i^t \quad (11)$$

$$r_i^{t+1} = (1 - e^{-yt}) \cdot r_i^0 \quad (12)$$

O Algoritmo Morcego Direcional (DBA), proposto por Chakri et al. (2017), é uma versão aprimorada do Algoritmo Morcego (BA) criada para evitar a convergência prematura. Sua principal modificação é diversificar a direção da busca: em vez de todos os morcegos seguirem apenas a melhor posição global ( $x^*$ ), cada morcego também se compara a um morcego aleatório ( $x_k$ ). Se o morcego aleatório for melhor, o movimento é influenciado por ambos, introduzindo variabilidade e ajudando o algoritmo a explorar o espaço, esse processo é descrito nas equações (13) e (14).

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (x_* - x_i^t) \cdot f_1 + (x_k^t - x_i^t) \cdot f_2 \quad (13)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (x_* - x_i^t) \cdot f_1 \quad (14)$$

Ainda, o DBA possui um controle maior sobre as dimensões das buscas locais, ficando mais concentradas ao decorrer das iterações, com a adição de um novo multiplicador  $W_i^t$  a equação (10), resultando nas equações (15) e (16).

$$x_{nova} = x_{velha} + \epsilon \cdot A^t \cdot W_i^t \quad (15)$$

$$W_i^t = \left( \frac{\frac{U_b - L_b}{K} - \frac{U_b - L_b}{\sigma \cdot K}}{1 - t_{max}} \right) \cdot (t - t_{max}) + \frac{U_b - L_b}{\sigma \cdot K} \quad (16)$$

A taxa de emissão  $r_i$  e a amplitude  $A_i$  também são afetadas, pois no DBA suas equações ficaram mais lineares (equações (17) e (18)).

$$A_i^t = \left( \frac{A_0 - A_\infty}{1 - t_{max}} \right) \cdot (t - t_{max}) + A_\infty \quad (17)$$

$$r_i^t = \left( \frac{r_0 - r_\infty}{1 - t_{max}} \right) \cdot (t - t_{max}) + r_\infty \quad (18)$$

### 3.4 Algoritmo de estudo

Para o AFDBA desenvolvido por Sampaio (2022), o equacionamento e lógicas são semelhantes ao DBA, com o diferencial de que a frequência, amplitude, taxa de emissão dos sinais emitidos pelos morcegos e peso de regulação de busca, agora são variáveis de saída que passa por uma inferência *Fuzzy*.

Os dados de entrada são a iteração e diversidade segundo Sampaio (2022), e usam número de iteração  $i$  e distância  $d_i$  entre determinado morcego e a melhor posição, como pode ser visto nas equações (19), (20) e (21).

$$I = \frac{i}{i_{max}} \quad (19)$$

$$d_i = |x_i - x_*| \quad (20)$$

$$D_i = \frac{d_i - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \quad (21)$$

Sendo  $i_{max}$  é o limite de iterações e  $d_{min}$  e  $d_{max}$  são as distâncias mínima e máxima entre morcegos. Além disso, nota-se que ambos  $I$  e  $D_i$  são valores entre 0 e 1, que sofrerão o

processo de *fuzzyficação*, onde são distribuídos, para *I*: começo, meio e fim, e para *Di*: baixo, médio e alto. Quando *I* se aproxima de 1, indica que as iterações estão chegando ao fim, já quando *Di* se aproxima de 1, indica que o morcego está gradativamente mais distante do morcego de melhor posição. Por conseguinte, desses graus de pertinência aos dados de entrada, é aplicada uma sequência de nove regras *Fuzzy* no formato “Se *I* é *X1* e *Di* é *X2*, então  $\Delta f$  é *Y1*, *Ai* é *Y2*, *ri* é *Y3* e *wf* é *Y4*”. Regras dispostas na Tabela 12.

Tabela 12 – Regras Fuzzy utilizadas no AFDBA.

Dados de entrada		Dados de saída			
I	Di	$\Delta f$	Ai	ri	wf
Começo	Baixo	Alto	Alto	Baixo	Baixo
Começo	Médio	Alto	Alto	Baixo	Baixo
Começo	Alto	Meio	Meio	Meio	Meio
		Alto	Alto	Baixo	Baixo
Meio	Baixo	Meio	Meio	Meio	Meio
		Alto	Alto	Baixo	Baixo
Meio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Meio	Alto	Meio	Meio	Meio	Meio
		Baixo	Baixo	Alto	Alto
Fim	Baixo	Meio	Meio	Meio	Meio
		Baixo	Baixo	Alto	Alto
Fim	Médio	Meio	Meio	Meio	Meio
		Baixo	Baixo	Alto	Alto
Fim	Alto	Baixo	Baixo	Alto	Alto

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do que foi disposto na Tabela 12, observa-se as equações (22) e (23):

$$w_i = \frac{U_b - L_b}{w_f} \quad (22)$$

$$f_i = \Delta f \cdot aleat \quad (23)$$

O  $w_f$  é o tamanho do vetor  $w_i$ ,  $\Delta f$  é a variação de frequência e *aleat* é uma variável aleatória entre 0 e 1. Logo, após realizada a *fuzzyficação* dos dados de entrada e aplicação das regras, são feitos o processo de *defuzzyficação* das variáveis de saída para serem aplicados em  $w_f$  e  $\Delta f$ , retornando para o código os valores  $f_i$ ,  $A_i$ ,  $r_i$  e  $w_i$  e as novas posições de todos os morcegos estarão prontas para serem definidas. Observa-se que não é necessário definir os parâmetros de entrada:  $A_0$ ,  $A_\infty$ ,  $r_0$ ,  $r_\infty$ ,  $f_{min}$  e  $f_{max}$ , sendo necessário informar somente a população de morcegos  $N_{pop}$  e o limite de iterações.

### 3.4.1 Aplicação no MATLAB

O MATLAB foi escolhido como o *software* para aplicação do algoritmo, pois é comprovadamente eficiente em otimizar esses processos, é de fácil uso e já conta com um recurso para lógica *Fuzzy*: *Fuzzy Tool Box*, oferece funcionalidades intuitivas para modelagem de sistemas *fuzzy*, incluindo definição de grupos, criação de regras, operações de inferência e defuzzificação, além de visualização gráfica. Além disso, é bastante usado no meio acadêmico, inclusive no trabalho de Sampaio (2022).

A implementação do AFDBA nas redes IEEE (de três e oito barras) segue um procedimento específico onde as "posições dos morcegos" (soluções do problema) são representadas por matrizes. Cada matriz ( $x_i$ ) tem "n" linhas (número de relés) e duas colunas, contendo o *TAP* ( $TAP_n$ ) e o Dial de Tempo ( $DT_n$ ) de cada relé. Para o sistema com inserção de GDFV, observa-se uma alteração nas correntes de curto, que se forem tratadas como a proteção padrão, em modelo mais engessado, não representariam boa proteção, tendo em vista que os parâmetros que definem os limites de *TAP*, provavelmente não iriam servir para todos os casos.

A função objetivo empregada para avaliar essas soluções é a mesma proposta por Sampaio (2022), buscando minimizar o tempo de atuação dos relés e penalizar a descoordenação entre relés primários e de backup. Matematicamente, a função  $F(x_i)$  é definida pela equação (24). Em resumo, o *TAP* determina o nível de corrente que "liga" o relé, enquanto o Dial de Tempo ajusta o tempo de atuação do relé com base na curva característica e na necessidade de coordenação do sistema. Juntos, eles garantem que a proteção atue apenas em correntes anormais e que o tempo de atuação seja o mais rápido possível, mas com um atraso seletivo para evitar desligamentos desnecessários em outras partes da rede.

$$\min F(x_i) = \sum_{k=1}^F \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} \left( (t_{op_{ik}}^2 + t_{op_{jk}}^2) + k \left( \Delta t_{op_{ijk}} - |\Delta t_{op_{ijk}}| \right)^2 \right) \quad (24)$$

Sendo  $(t_{op_{ik}}^2 + t_{op_{jk}}^2)$  a soma dos quadrados dos tempos de atuação dos relés primário e backup, e  $\left( \Delta t_{op_{ijk}} - |\Delta t_{op_{ijk}}| \right)^2$  a penalidade por descoordenação, com  $\Delta t_{op_{ijk}}$  sendo a diferença entre a margem de coordenação do sistema e o limite imposto, com k sendo um peso de descoordenação atribuído. Além disso, F, N e  $M_i$  estão representando o número de faltas, número de relés e relés de backup, respectivamente.

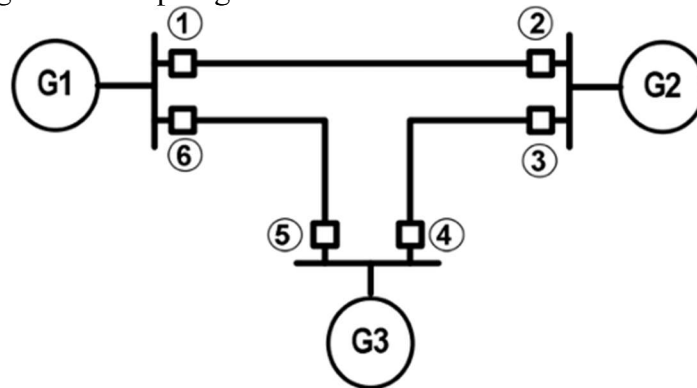
### 3.5 Apresentação das redes e Aplicação

As redes do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), são bastante difundidas no meio acadêmico para utilização em estudos, como o presente trabalho. Como o embasamento se dá pelos trabalhos de Sampaio (2022) e Martins (2024), foram utilizadas essas redes, nesse caso: de três e oito barras.

#### 3.5.1 Rede IEEE de três barras

Segundo Amraee (2012), essa rede conta com seis relés de sobrecorrente direcional e tem topologia representada na Figura 15:

Figura 15 – Topologia da rede IEEE de três barras.



Fonte: (AMRAEE, 2012)

A partir disso, utilizando da ferramenta OpenDSS, foi permitido implementar e simular o circuito com o incremento de GDFV em diferentes níveis de penetração. A simulação utiliza o modo *daily* para seus resultados, ou seja, sendo realizada no período de 24 horas, onde a demanda, consumo de cargas e a geração fotovoltaica são obtidas por curvas de multiplicadores, que irão limitar os fatores máximos tanto da potência consumida, quanto da geração distribuída pelos horários, sendo a carga FV adicionada ao ponto do relé 5.

Portanto, são definidos três picos de potência da geração fotovoltaica, sendo de 0% de carga nominal (sem geração, rede somente com potência demandada), de 50% da carga nominal e 100% da carga nominal, como mostrado na Figura 16:

Figura 16 – Potência de pico de geração FV e Potência demandada ao longo do dia.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com isso, é possível também obter as correntes de curto que são usadas para parametrização dos relés e essenciais para verificação da proteção adaptativa pelo algoritmo. Os dados de corrente de curto para Rede IEEE de três barras estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 – Correntes de curto para diferentes níveis de penetração da GD.

Relés Primário	Corrente de curto (A) – FV 0%	Corrente de curto (A) – FV 50%	Corrente de curto (A) – FV 100%
1	2013,8	2514,1	2896,2
2	1672,1	2001,7	2124,2
3	1570,6	1980,9	2354,3
4	1880,3	2265,1	2621,1
5	1601,2	1996,1	2455,9
6	1820,8	2203,5	2752,3
<b>Relés de Backup – Relé primário associado</b>			
1 - 3	701,3	998,2	1211,3
2 - 6	188,7	314,1	488,2
3 - 5	420,5	532,3	784,2
4 - 2	599,3	722,1	1130,1
5 - 1	184,7	325,3	422,4
6 - 4	502,6	695,5	841,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Amraee (2012), as relações de transformações dos TCs da rede de três barras é a disposta na Tabela 14:

Tabela 14 – Valores RTCs para os relés 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)

Sendo assim, a rede pode ser implementada no algoritmo AFDBA, a partir das definições de  $TAP_{min}$ ,  $TAP_{max}$ ,  $DT_{min}= 0,1s$ ,  $DT_{max}= 1,1s$ ,  $Top_{min}= 0,1s$ ,  $Top_{max}= 1,1s$ ,  $CT_{Imin}= 0,3s$ ,  $k= 120$ ,  $N_{pop}= 50$  e  $N_{iter}= 1000$ . No algoritmo, foi preciso fazer uma adaptação para ajuste do  $TAP$  devido à natureza dinâmica de inserção de GDFV na rede, pegando os valores calculados médios obtidos através da adequação do código do algoritmo, obtém-se ( $0,8A \leq TAPn \leq 4,0 A$ ) em média. Com isso, obteve-se os resultados nas Tabelas 15, 16 e 17:

Tabela 15 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de três barras pelo AFDBA – GDFV 0%.

Relé	TAP (A)	DT (s)
1	3,1498	0,101
2	1,3534	0,101
3	2,7987	0,102
4	2,5566	0,101
5	1,5645	0,100
6	1,9325	0,100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de três barras pelo AFDBA – GDFV 50%.

Relé	TAP (A)	DT (s)
1	3,5987	0,101
2	1,7987	0,101
3	3,3215	0,101
4	2,9741	0,101
5	1,9333	0,100
6	2,4588	0,100

Fonte: Elaborado pelo autor.

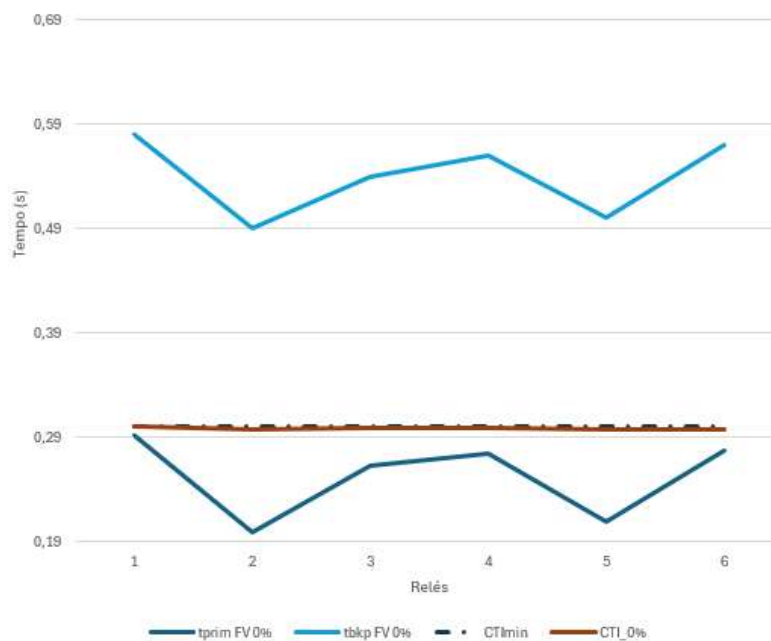
Tabela 17 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de três barras pelo AFDBA – GDFV 100%.

Relé	TAP (A)	DT (s)
1	3,9447	0,102
2	1,9667	0,101
3	3,5212	0,10
4	3,3021	0,101
5	2,3785	0,100
6	2,942	0,101

Fonte: Elaborado pelo autor.

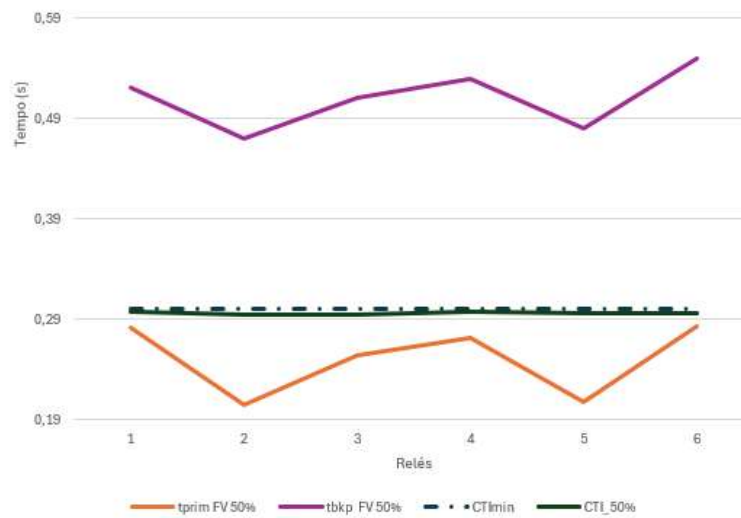
Diante disso, verifica-se que os valores de DT e *TAP* seguem os limites estabelecidos para cada um, estando aptos ao uso da rede e variações de carga devido ao incremento de geração fotovoltaica. Para melhor visualização dos resultados, utilizando os dados apresentados no tópico 3.5.1 aplicados a equação (1), foram elaborados gráficos para avaliação de atendimento das condições de restrição aplicadas aos valores de tempo de operação e margem de coordenação dos relés. Os gráficos das Figura 17, 18 e 19, mostram que as margens de coordenação entre os relés primário e de backup, para as diferentes condições de penetração da carga FV.

Figura 17 – Tempo de atuação para Rede IEEE três barras com 0% de FV.



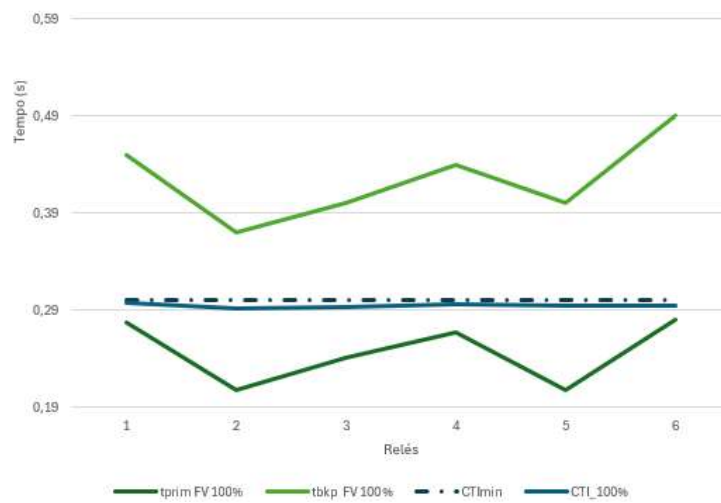
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 18 – Tempo de atuação para Rede IEEE três barras com 50% de FV.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 19 – Tempo de atuação para Rede IEEE três barras com 100% de FV.



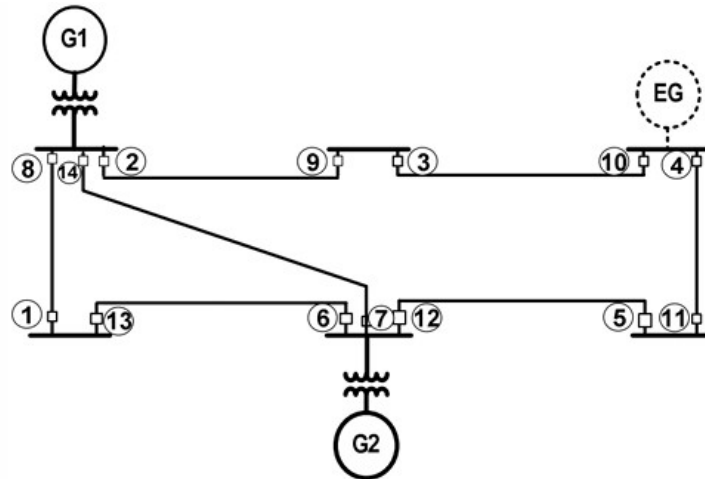
Fonte: Elaborado pelo Autor

Conclui-se que para todos os casos, foram atendidos os critérios limitantes estabelecidos, além de os relés primário e de backup apresentarem valores de tempo de atuação próximos ao limite mínimo estabelecido (com uma descoordenação de aproximadamente 0,75%). Contudo, foi observado que à medida que foi incrementado a FV, a descoordenação ficou mais acentuada.

### 3.5.2 Rede IEEE de oito barras

Segundo Amraee (2012), essa rede conta com quatorze relés de sobrecorrente direcional e tem topologia representada na Figura 20:

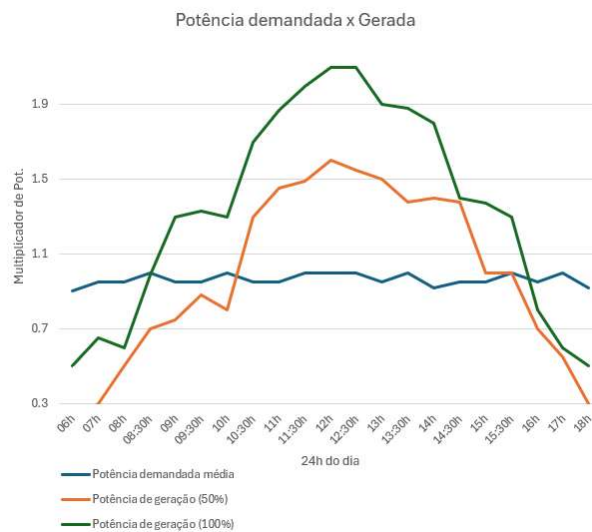
Figura 20 – Topologia da rede IEEE de três barras.



Fonte: (AMRAEE, 2012)

O procedimento de simulação é o mesmo do tópico 3.5.1, com os mesmos níveis de penetração, sendo a carga FV adicionada ao ponto do relé 12.

Figura 21 – Potência de pico de geração FV e Potência demandada ao longo do dia.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com isso, é possível também obter as correntes de curto que são usadas para parametrização dos relés e essenciais para verificação da proteção adaptativa e o algoritmo. Os

dados de corrente de curto para Rede IEEE de oito barras estão dispostos nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 – Correntes de curto para diferentes níveis de penetração da GD – Relés Primário.

<b>Relés Primário</b>	<b>Corrente de curto (A) – FV 0%</b>	<b>Corrente de curto (A) – FV 50%</b>	<b>Corrente de curto (A) – FV 100%</b>
1	3341,1	3508,1	4176,3
2	5988,2	6527,1	7066,0
2	5988,2	6327,8	7305,6
3	3645,1	3900,2	4483,4
4	3874,3	4192,2	4744,3
5	2555,2	2785,1	3117,3
6	6203,4	6647,6	7444,0
6	6203,4	6741,6	7257,9
7	5261,3	5639,1	6470,1
7	5261,3	5727,8	6049,4
8	6150,1	6703,6	7441,1
8	6150,1	6554,6	7072,6
9	2544,8	2697,4	3170,0
10	3921,7	4209,7	4590,3
11	3881,3	4094,9	4851,6
12	5912,4	6470,2	7390,1
12	5912,4	6271,1	6977,6
13	3003,6	3288,9	3583,4
14	5250,6	5565,6	6248,2
14	5250,6	5743,1	6563,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Correntes de curto para diferentes níveis de penetração da GD – Relés de backup.

Relés de Backup	Corrente de curto (A) – FV 0%	Corrente de curto (A) – FV 50%	Corrente de curto (A) – FV 100%
6	3308,4	3533,34	4272,39
1	1001,8	1089,87	1202,16
7	1957,8	2122,66	2530,68
2	3722,0	4023,92	4752,99
3	2253,3	2409,22	2873,43
4	2496,3	2727,02	3217,14
5	1255,3	1371,31	1600,6
14	1909,7	2094,62	2320,18
5	1250,7	1330,1	1500,84
13	1000,9	1060,26	1251,12
7	1938,0	2109,91	2383,82
9	1219,1	1288,93	1584,8
10	2519,1	2682,05	3073,36
11	2354,2	2525,74	2895,65
12	3852,1	4220,11	4652,38
13	1013,4	1105,78	1289,2
14	1877,0	1974	2397,09
8	3021,3	3264,56	3625,56
1	1016,3	1097,61	1281,04
9	1217,8	1306,21	1522,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Amraee (2012), as relações de transformações dos TCs da rede de oito barras é a disposta na Tabela 20:

Tabela 20 – Valores RTCs para os relés 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)

Sendo assim, a rede pode ser implementada no algoritmo AFDBA, a partir das definições de  $TAP_{min}$ ,  $TAP_{max}$ ,  $DT_{min}= 0,1s$ ,  $DT_{max}= 1,1s$ ,  $Top_{min}= 0,1s$ ,  $Top_{max}= 1,1s$ ,  $CT_{lmin}= 0,3s$ ,  $k= 120$ ,  $N_{pop}= 150$  e  $N_{iter}= 1000$ . No algoritmo, foi preciso fazer uma adaptação para ajuste do  $TAP$  devido à natureza dinâmica de inserção de GDFV na rede, pegando os valores calculados médios obtidos através da adequação do código do algoritmo, obtém-se ( $0,8A \leq TAPn \leq 3,5 A$ ) em média. Com isso, obteve-se os resultados nas Tabelas 21, 22 e 23:

Tabela 21 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de oito barras pelo AFDBA – GDFV 0%.

Relé	TAP (A)	DT (s)
1	2,4491	0,154
2	2,5895	0,182
3	2,3199	0,211
4	2,482	0,1455
5	2,3975	0,110
6	2,3816	0,171
7	2,5183	0,281
8	2,3993	0,144
9	2,4822	0,151
10	2,416	0,186
11	2,3499	0,197
12	2,3512	0,191
13	2,3624	0,128
14	2,4558	0,200

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de oito barras pelo AFDBA – GDFV 50%.

Relé	TAP (A)	DT (s)
1	2,9079	0,1838
2	3,1242	0,2237
3	2,7539	0,2563
4	2,9256	0,1749
5	2,969	0,1355
6	2,8284	0,2058
7	2,9638	0,3364
8	2,8833	0,175
9	3,0159	0,1844
10	2,8297	0,227
11	2,7453	0,2374
12	2,746	0,2294
13	2,7635	0,1586
14	2,8844	0,2347

Fonte: Elaborado pelo autor.

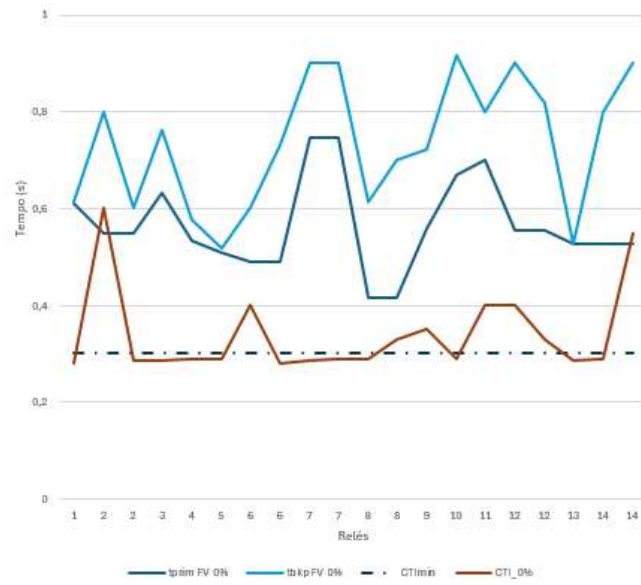
Tabela 23 – Valores de TAP e DT da rede IEEE de oito barras pelo AFDBA – GDFV 100%.

<b>Relé</b>	<b>TAP (A)</b>	<b>DT (s)</b>
1	3,2813	0,2067
2	3,3386	0,2381
3	3,0783	0,2818
4	3,1682	0,1847
5	3,1479	0,1423
6	3,2001	0,2176
7	3,284	0,3777
8	3,1428	0,1858
9	3,1058	0,1995
10	3,2555	0,2485
11	2,9406	0,2627
12	3,0635	0,2557
13	3,0858	0,1687
14	3,2318	0,2600

Fonte: Elaborado pelo autor.

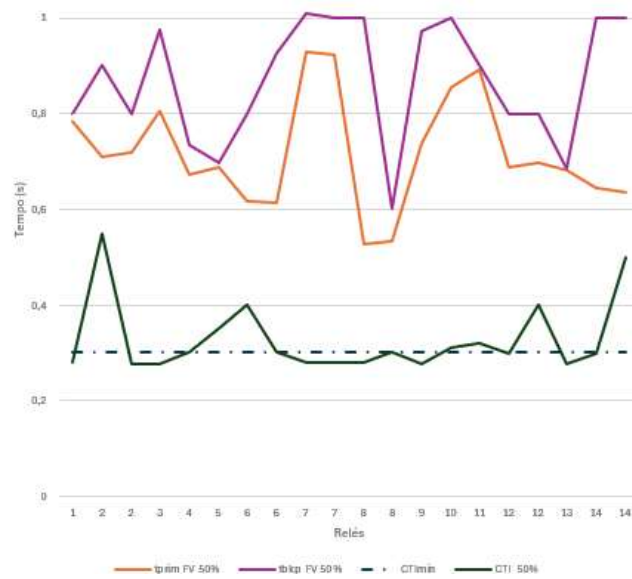
Diante disso, verifica-se que os valores de DT e *TAP* seguem os limites estabelecidos para cada um, estando aptos ao uso da rede e variações de carga devido ao incremento de geração fotovoltaica. Para melhor visualização dos resultados, utilizando os dados apresentados no tópico 3.5.2 aplicados a equação (1), foram elaborados gráficos para avaliação de atendimento das condições de restrição aplicadas aos valores de tempo de operação e margem de coordenação dos relés. Os gráficos das Figuras 22, 23 e 24, mostram as margens de coordenação entre os relés primário e de backup, para as diferentes condições de penetração da carga FV.

Figura 22 – Tempo de atuação para Rede IEEE oito barras com 0% de FV.



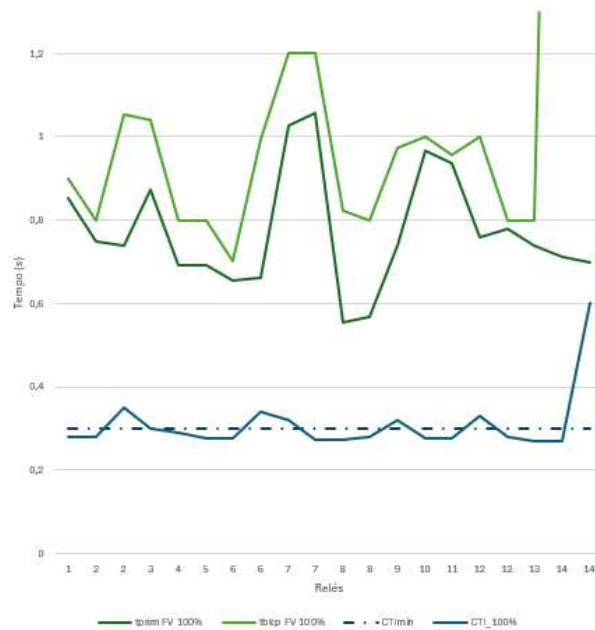
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 23 – Tempo de atuação para Rede IEEE oito barras com 50% de FV.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 24 – Tempo de atuação para Rede IEEE oito barras com 100% de FV.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Conclui-se que para todos os casos, foram atendidos os critérios limitantes estabelecidos, contudo os relés primário e de backup apresentarem valores mais descoordenados.

### 3.6 Considerações finais

Por conseguinte, com as simulações de rede no OpenDSS, foi possível observar dados satisfatórios usados para relacionar as potências de geração e demanda para definir os níveis de penetração da GDFV na rede, bem como obter a correntes de curto-circuito. Diante disso, ainda foi possível verificar o funcionamento de algoritmo AFDBA, analisando suas adaptações às diferentes cargas fotovoltaicas quanto ao tempo de atuação e correlação com os dados pré-definidos pelo usuário, verificando o funcionamento da proteção adaptativa.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, são expostos os resultados obtidos no tópico 3, analisando a adequação da rede ao OpenDSS com o impacto da inserção da GDFV, bem como avaliando os tempos de operação dos relés, visando compará-los com os resultados de Martins (2024), que se baseia em Sampaio (2022).

### 4.1 Níveis de corrente de curto

Como disposto na Tabela 13 e 18, as correntes de curto sem penetração de geração distribuída fotovoltaica apresentaram valores próximos ao que era esperado segundo Amraee (2012) e apresentado por Martins (2024), sendo suas diferenças plausíveis com a adequação da rede de três e oito barras no OpenDSS. Em contrapartida, com o incremento de GDFV, observa-se um aumento considerável à medida que foram inseridos os outros níveis de penetração, o que confirma o conhecimento teórico do impacto da GDFV apresentado no capítulo 2. As Tabelas 24 e 25 compara os valores de corrente de curto definidos por Amraee (2012) e os encontrados no presente estudo para as redes em análise.

Tabela 24 – Comparação dos níveis de curto rede IEEE de três barras.

Relés Primário	Corrente de curto (A) – FV 0% (Amraee, 2012)	Corrente de curto (A) – FV 0%	Corrente de curto (A) – FV 50%	Corrente de curto (A) – FV 100%
1	1978,9	2013,8	2514,1	2896,2
2	1525,7	1672,1	2001,7	2124,2
3	1683,9	1570,6	1980,9	2354,3
4	1815,4	1880,3	2265,1	2621,1
5	1499,66	1601,2	1996,1	2455,9
6	1766,3	1820,8	2203,5	2752,3
<b>Relés de Backup</b>				
1	617,22	701,3	998,2	1211,3
2	145,34	188,7	314,1	488,2
3	384	420,5	532,3	784,2
4	545	599,3	722,1	1130,1
5	175	184,7	325,3	422,4
6	466,17	502,6	695,5	841,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 25 – Comparação dos níveis de curto rede IEEE de oito barras (a) primário e (b) backup.

<b>Relés Primário</b>	<b>Corrente de curto (A) – FV 0% (Amraee, 2012)</b>	<b>Corrente de curto (A) – FV 0%</b>	<b>Corrente de curto (A) – FV 50%</b>	<b>Corrente de curto (A) – FV 100%</b>
1	3232	3341,1	3508,1	4176,3
2	5924	5988,2	6527,1	7066,0
2	5924	5988,2	6327,8	7305,6
3	3556	3645,1	3900,2	4483,4
4	3783	3874,3	4192,2	4744,3
5	2401	2555,2	2785,1	3117,3
6	6109	6203,4	6647,6	7444,0
6	6109	6203,4	6741,6	7257,9
7	5223	5261,3	5639,1	6470,1
7	5223	5261,3	5727,8	6049,4
8	6093	6150,1	6703,6	7441,1
8	6093	6150,1	6554,6	7072,6
9	2484	2544,8	2697,4	3170,0
10	3883	3921,7	4209,7	4590,3
11	3707	3881,3	4094,9	4851,6
12	5899	5912,4	6470,2	7390,1
12	5899	5912,4	6271,1	6977,6
13	2991	3003,6	3288,9	3583,4
14	5199	5250,6	5565,6	6248,2
14	5199	5250,6	5743,1	6563,2

(a) Primário

Relés de Backup	Corrente de curto (A) – FV 0% (Amraee, 2012)	Corrente de curto (A) – FV 0%	Corrente de curto (A) – FV 50%	Corrente de curto (A) – FV 100%
6	3232	3308,4	3533,34	4272,39
1	996	1001,8	1089,87	1202,16
7	1890	1957,8	2122,66	2530,68
2	3556	3722,0	4023,92	4752,99
3	2244	2253,3	2409,22	2873,43
4	2401	2496,3	2727,02	3217,14
5	1197	1255,3	1371,31	1600,6
14	1874	1909,7	2094,62	2320,18
5	1197	1250,7	1330,1	1500,84
13	987	1000,9	1060,26	1251,12
7	1890	1938,0	2109,91	2383,82
9	1165	1219,1	1288,93	1584,8
10	2484	2519,1	2682,05	3073,36
11	2344	2354,2	2525,74	2895,65
12	3707	3852,1	4220,11	4652,38
13	987	1013,4	1105,78	1289,2
14	1874	1877,0	1974	2397,09
8	2991	3021,3	3264,56	3625,56
1	996	1016,3	1097,61	1281,04
9	1165	1217,8	1306,21	1522,25

## (b) Backup

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, a proximidade dos resultados base e a coerência dos novos valores, permite concluir o bom potencial de simulação do OpenDSS.

#### 4.2 Velocidade de atuação

Posteriormente, com as Tabelas apresentadas nos tópicos 3.5.1 e 3.5.2 referentes aos valores de *TAP* e Dial de Tempo, também foi perceptível a proximidade com os resultados de Martins (2024) no que se refere ao nível 0% de penetração, o que era esperado tendo em vista as correlações do tópico 4.1. As pequenas diferenças são compreensíveis, devido as diferenças de corrente de curto e ambientes de simulação. A Tabela 26 (a) apresenta a comparação para rede de três barras e (b) a de oito barras.

Tabela 26 – Comparação dos valores de TAP e DT da rede IEEE de três barras pelo AFDBA – GDFV 0%

Relé	Valores de Martins (2024)		Presente trabalho	
	TAP (A)	DT (s)	TAP (A)	DT (s)
1	2,8366	0,1000	3,1498	0,101
2	1,0664	0,1000	1,3534	0,101
3	2,4177	0,1000	2,7987	0,102
4	2,2027	0,1000	2,5566	0,101
5	1,3193	0,1000	1,5645	0,100
6	1,6902	0,1000	1,9325	0,100

(a) Rede IEEE de três barras

Relé	Valores de Martins (2024)		Presente trabalho	
	TAP (A)	DT (s)	TAP (A)	DT (s)
1	2,1187	0,1001	2,4491	0,154
2	2,5000	0,2472	2,5895	0,182
3	2,5000	0,2141	2,3199	0,211
4	2,4990	0,1522	2,482	0,1455
5	2,3218	0,1000	2,3975	0,110
6	2,4999	0,1640	2,3816	0,171
7	2,4999	0,2317	2,5183	0,281
8	2,5000	0,1606	2,3993	0,144
9	2,5000	0,1401	2,4822	0,151
10	2,4996	0,1676	2,416	0,186
11	2,4997	0,1775	2,3499	0,197
12	2,4998	0,2522	2,3512	0,191
13	2,1213	0,1000	2,3624	0,128
14	2,4989	0,2336	2,4558	0,200

(b) Rede IEEE de oito barras

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, com o incremento da geração distribuída fotovoltaica, verificou-se os tempos de atuação dos relés, como demonstrando com os gráficos das Figuras 17 a 19 (três barras) e 22 a 24 (oito barras). É possível analisar, somando os tempos de atuação nos relés (TTA) primários, o impacto dessa inserção na proteção adaptativa, que estão expostos na Tabela 27.

Tabela 27 – Tempo de atuação dos relés para rede de três e oito barras em diferentes níveis de penetração.

Rede de três barras			Rede de oito barras		
TTA (s)			TTA (s)		
FV 0%	FV 50%	FV 100%	FV 0%	FV 50%	FV 100%
1,515137	1,50364	1,482804	11,308	14,345	15,448

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo assim, para a rede de três barras, a diferença em relação a Martins (2024), que obteve um tempo de 1,4331 s para rede base, são mínimas, apesar do maior tempo de atuação. Ou seja, algoritmo mostrou excelente funcionamento, tendo em vista a sua adaptação às mudanças e, inclusive, melhora na entrega dos resultados com o incremento da rede no maior nível de penetração.

Todavia, a rede de oito barras, antes com tempo de 7,9725 s (MARTINS, 2024), apresentou maior discrepância como visto na Tabela 27, tendo um tempo de atuação consideravelmente maior, considerando que o estudo de proteção e atuação dos relés ocorrem muitas vezes em espaço de tempo mínimos. Além disso, à medida que se adiciona a penetração FV, o tempo também segue a crescente, o que é compreensível pela complexidade da rede em tamanho e geração junto as alterações nos valores de *TAP* feitas no algoritmo.

### 4.3 Considerações finais

Por conseguinte, avaliando os resultados e as análises comparativas, observa-se que a implementação da rede ao OpenDSS foi bastante eficiente, apresentando variações abaixo de 10% em relação aos valores de corrente de curto, o que afeta também nas grandezas obtidas posteriormente, como os *TAPs* e *DTs*, comprovando a eficácia da ferramenta em estudos que envolvem a implementação de redes de geração distribuída fotovoltaica.

Ademais, foi constatado que o AFDBA apresentou ótimo desempenho frente às implementações FV, com tempo de atuação dos relés bem próximos aos valores observados por Martins (2024) para nenhum nível de penetração, mas também se mostrou totalmente adaptável aos demais degraus de incremento da GDFV, mesmo com um desvio maior considerável para a rede de oito barras.

## 5 CONCLUSÃO

Diante do crescimento da geração distribuída fotovoltaica dos últimos anos, o presente estudo buscou ampliar a análise de redes com inserção de geração distribuída e a aplicação do algoritmo para proteção adaptativa, inicialmente desenvolvido por Sampaio (2022) e continuado por Martins (2024). Para isso, é importante o destaque da análise comparativa de desempenho do AFDBA com o que foi proposto, adequando o estudo ao *software* OpenDSS e inserindo cargas fotovoltaicas, o que enfatiza a base para cenários cada vez mais presentes na rede elétrica mundial.

Em posse do conhecimento sobre o *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm*, foi possível averiguar o comportamento das duas redes IEEE (três e oito barras) em diferentes cenários e comparar seus impactos em relação ao critério de tempo de atuação dos relés. Em um primeiro momento, adequando o estudo das redes ao *software* Open Distribution System Simulator, comparando seus resultados com os valores de origem, que se mostrou uma ferramenta robusta e eficaz na análise do sistema. Em seguida, implementando e avaliando o algoritmo em estudo, para averiguar sua aplicabilidade nas condições propostas no que tange os resultados de correntes de atuação, dia de tempo, tempo de atuação e coordenação dos relés, garantindo a proteção adaptativa e podendo compará-la com outros estudos.

Portanto, a partir dos resultados obtidos, observou-se que a corrente de curto advinda da aplicação do OpenDSS, teve bastante proximidade com resultados advindos da literatura, mostrando coerência do crescimento dessa grandeza ao incrementar maiores níveis de penetração de carga fotovoltaica na rede. Em paralelo, o AFDBA se mostrou tão eficiente quanto nos trabalhos usados como base, tendo em vista a variação mínima sofrida diante das condições estabelecidas, com um tempo de atuação também condizente com as alterações propostas, mantendo-se baixo, como esperado para a proteção do relé, mesmo com as diferenças mais consideráveis na rede de oito barras.

Diante disso, foi possível compreender o comportamento dos parâmetros elétricos de uma rede com inserção de GDFV interessantes para análise das proteções adaptativas. Além de reafirmar o impacto contributivo do *Adaptive Fuzzy Directional Bat Algorithm* no cumprimento das necessidades desse tipo de proteção nos sistemas.

Por fim, avaliando possíveis desafios para trabalhos futuros com base na aplicação do presente trabalho, observou-se:

- Necessidade de adequação das funções de proteção junto ao algoritmo estudado;
- Investigar a diminuição do tempo à medida que aumenta a penetração na rede de três barras, e o inverso na rede de oito barras;
- Explorar a ferramenta OpenDSS para análise de mais grandezas do sistema, testando para redes maiores.

## 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;

ADIB, R. **Renewables 2024 Global Status Report - Energy Supply**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>>. Acesso em: 03 mar. 2025;

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 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Brasil é 6º colocado no ranking global de energia solar de 2024**. Absolar, 5 abr. 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/brasil-e-6o-colocado-no-ranking-global-de-energia-solar-de-2024/>>. Acesso em: 15 mai. 2025;

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;

BENEDITO, R. DA S.; MACEDO, W. N.; ZILLES, R. **A Produção de Eletricidade com Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Barreira Econômica, Pontos de Conexão e Mecanismos de Incentivo**. III Conferência Regional Latino-Americana da ISES. Anais...2008;

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

COSTER, Edward; MYRZIK, Johanna; KLING, Wil. Effect of DG on distribution grid protection. In: GAONKAR, D. N. **Distributed Generation** . [S.l.: s.n.], 2010. cap. 5, p. 93 118. v. 1. Disponível em: . Acesso em: 28 mai. 2025;

DUNGAN, Roger C. **OpenDSS PVSystem Element Model**. EPRI 2011;

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

Acesso em: 20 mai. 2025;

EPE. **Fontes de Energia Renováveis**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>>. Acesso em: 03 mar. 2025;

ESSLINGER, P.; WITZMANN, R. **Increasing grid transmission capacity and power quality by a new solar inverter concept and inbuilt data communication**. 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). Anais...IEEE, out. 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5638867/>>. Acesso em: 23 mai. 2025;

FURTADO SAMPAIO, R. **Introdução aos Sistemas Elétricos de Potência**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2022;

GUTIERREZ-ROJAS, D. et al. **Review of the State-of-the-Art on Adaptive Protection for Microgrids based on Communications**. 30 jun. 2020;

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global energy investment set to rise to \$3.3 trillion in 2025 amid economic uncertainty and energy security concerns. **IEA**, 5 jun. 2025. News. Disponível em: <<https://www.iea.org/news/global-energy-investment-set-to-rise-to-3-3-trillion-in-2025-amid-economic-uncertainty-and-energy-security-concerns>>. Acesso em: 18 jun. 2025;

JENKINS, Nicholas; EKANAYAKE, Janaka B.; STRBAC, Goran. **Distributed Generation**. KATIRAEI, F.; AGUERO, J. Solar PV Integration Challenges. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 9, n. 3, p. 62–71, maio 2011;

London: The Institution Of Engineering And Technology, 2010;

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;

MARTINS, Luca Macêdo et al. Análise comparativa de métodos de otimização aplicados à proteção adaptativa de relés direcionais em redes com geração distribuída. SOCIEDADE BRASILEIRA DE AUTOMÁTICA. SBA, 2024. Disponível em: <[https://www.sba.org.br/cba2024/papers/paper\\_7667.pdf](https://www.sba.org.br/cba2024/papers/paper_7667.pdf)>. Acesso em: 02 fev. 2025;

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

PALUDO, J. A. **Avaliação dos Impactos de Elevados Níveis de Penetração da Geração Fotovoltaica no Desempenho de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em 72 Regime Permanente**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014;

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2014. Disponível em: <[https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 20 mai. 2025;

RODRÍGUEZ, C. R. C. **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2002;

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;

SEXAUER, Jason. **Introdução ao OpenDSS**. [S.l.: s.n.], 2016. 33 p. Disponível em:

<<https://docplayer.com.br/56214033-Introducao-ao-openss.html>>. Acesso em: 14 jun. 2025;

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