

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**GEOVANE SASS CECCATO**

**DETERMINAÇÃO DAS MELHORES CURVAS DE CONTROLE VOLT/VAR PARA  
INVERSORES INTELIGENTES USANDO ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO**

**Ilha Solteira, SP  
2024**

**GEOVANE SASS CECCATO**

**DETERMINAÇÃO DAS MELHORES CURVAS DE CONTROLE VOLT/VAR PARA  
INVERSORES INTELIGENTES USANDO ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Jonatas Boas Leite  
**Orientador**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C388d Ceccato, Geovane Sass.  
Determinação das melhores curvas de controle Volt/Var para inversores inteligentes usando algoritmo evolucionário / Geovane Sass Ceccato. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
62 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,  
2024

Orientador: Jonatas Boas Leite

Inclui bibliografia

1. Geração distribuída. 2. Inversores inteligentes. 3. Algoritmos evolucionários. 4. Curvas Volt-Var.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e seis dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente *Geovane Sass Ceccato*, matriculado sob o nº 162054106, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. *Jonatas Boas Leite*, o Prof. Dr. *André do Amaral Penteado Biscaro* e o Dr. *Lucas do Carmo Yamaguti*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"Determinação das Melhores Curvas de Controle Volt/Var para Inversores Inteligentes usando Algoritmo Evolucionário"**, obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Orientador -



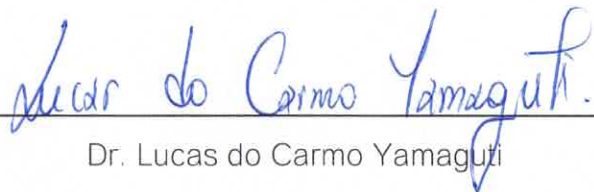
Geovane Sass Ceccato

- Discente -



Prof. Dr. André do Amaral Penteado Biscaro

- Membro da Banca -



Dr. Lucas do Carmo Yamaguti

- Membro da Banca -

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus, meu amigo leal que abençoa, protege e permite realizar os meus sonhos. E à minha família por todo carinho, apoio e amor.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família que amo infinitamente, que proveu todo o apoio necessário nessa longa jornada, Simone Sass Ceccato, Vandevaldo Luis Ceccato e Livia Sass Ceccato.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jonatas Boas Leites, por todo apoio, paciência e profissionalismo em me conduzir na confecção desse trabalho.

Aos meus amigos Felipe, Rafael, Ygor, Lucas e Deyvid, por toda a colaboração e companheirismo nos melhores e piores fases da nossa vida acadêmica.

À Unesp campus de Ilha Solteira, instituição a qual tenho orgulho de pertencer, ao Departamento de Engenharia Elétrica, por todo o suporte, conhecimento e excelência no ensino e pesquisa.

À minha turma de Engenharia Elétrica 2016/2, companheiros de graduação que compartilharam experiências e fizeram parte dessa jornada.

A todo o corpo docente, técnicos e funcionários da FEIS que permitiram o meu aprendizado, crescimento e desenvolvimento.

"O desenvolvimento progressivo do homem é vitalmente dependente da invenção. É o produto mais importante da sua mente criativa."

— Nikola Tesla

## RESUMO

Neste trabalho é discutido como a inserção de fontes de geração distribuída nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica tem revelado diversos benefícios na qualidade da energia, confiabilidade e robustez do sistema. Contudo, com a alta penetração desses dispositivos outros problemas começaram a aparecer, de modo a impactar negativamente essas redes como a sobretensão e o fluxo reverso de potência. Assim, novas tecnologias começaram a ser desenvolvidas, como os inversores inteligentes, que realizam o controle da geração e da disponibilização de potência reativa das gerações distribuídas na rede pelas curvas de controle como, por exemplo, a Volt-VAr. Muitas vezes, a configuração de fábrica que os inversores possuem não é adequada para realizar o controle ótimo da geração distribuída que está ligada nele, e, nesse sentido, será empregado um algoritmo evolucionário para encontrar a melhor parametrização a fim de configurar os inversores de maneira dinâmica e específica para o circuito de teste IEEE 123 barras.

**Palavras-chave:** Geração distribuída; inversores inteligentes; curvas Volt-VAr; algoritmos evolucionários.

## ABSTRACT

In this work, we discuss how the integration of distributed generation sources into power transmission and distribution systems has revealed various benefits in terms of power quality, system reliability, and robustness. However, with the high penetration of these devices, other issues have started to arise, negatively impacting these networks, such as overvoltage and reverse power flow. Consequently, new technologies have begun to emerge, such as smart inverters that control the generation and provision of reactive power from distributed generation in the network through control curves like Volt-VAr. Often, the factory settings of inverters are not suitable for optimal control of the distributed generation connected to them. In this context, an evolutionary algorithm will be employed to find the best parameterization to configure the inverters dynamically and specifically for the IEEE 123-bus test circuit.

**Keywords:** Distributed Generation; Smart Inverters; Volt-VAr curve; evolutionary algorithms.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Curva da função de controle Volt-Watt.....  | 23 |
| Figura 2 – Curva da função de controle Volt-VAr .....  | 25 |
| Figura 3 – Fluxograma de um algoritmo evolucionário.....   | 29 |
| Figura 4 – Diagrama unifilar da rede teste IEEE 123 barras.....                                  | 30 |
| Figura 5 – Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico implementado pelo software<br>OpenDSS ..... | 31 |
| Figura 6 - Curva de carga industrial.....  | 35 |
| Figura 7 - Curva de carga residencial.....   | 36 |
| Figura 8 - Tempo de execução do algoritmo genético .....   | 45 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Penalidades aplicadas para cada faixa de tensão .....   | 39 |
| Tabela 2 - Parametrização dos operadores genéticos do algoritmo .....  | 42 |
| Tabela 3 - Simulação do circuito original com curva de demanda horária residencial .....   | 43 |
| Tabela 4 - Simulação do circuito original com curva de demanda horária industrial .  | 43 |
| Tabela 5 - Simulação com sistema fotovoltaico sem otimização e curva de demanda horária residencial.....   | 44 |
| Tabela 6 - Simulação com sistema fotovoltaico sem otimização e curva de demanda horária industrial.....  | 44 |
| Tabela 7 - Simulação com sistema fotovoltaico com otimização e curva de demanda horária residencial.....   | 46 |
| Tabela 8 - Simulação com sistema fotovoltaico com otimização e curva de demanda horária industrial.....  | 46 |
| Tabela 9 - Média e moda das tensões da simulação com sistema fotovoltaico com otimização e curva de demanda horária com característica industrial..... | 48 |
| Tabela 10 - Média e moda das tensões da simulação com sistema fotovoltaico com otimização e curva de demanda horária com característica residencial... | 49 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|         |   |
|---------|---|
| ABSOLAR | Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica                           |
| ANEEL   | Agência Nacional de Energia Elétrica  |
| EPRI    | <i>Electric Power Research Institute</i>                                      |
| PRODIST | Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| TL      | Tensão de Leitura   |
| UNESP   | Universidade Estadual Paulista  |

## LISTA DE VARIÁVEIS

- $\sigma$  – Soma dos desvios das tensões nos nós do circuito
- $\alpha$  – Irradiação de base dada por kW/m<sup>2</sup>
- $\alpha(t)$  – Irradiação no tempo t
- $\rho$  – Penalidade aplicada na função objetivo
- $P_{mp}$  – Potência no ponto de máxima potência
- $P_{dc}$  – Potência DC de saída do painel fotovoltaico
- $P_{saída}$  – Potência AC de saída do sistema fotovoltaico
- $F_c(T(t))$ : Fator de correção de potência do painel fotovoltaico
- $V_{n,t}$  – Tensão de leitura no nó n no tempo t
- $eff(P_{saída})$  – Eficiência do inversor inteligente
- $T(t)$  – Temperatura no instante t

## SUMÁRIO

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                     | <b>16</b> |
| 1.1.      | Objetivo Geral  | 18        |
| 1.2.      | Objetivos Específicos                                 | 18        |
| 1.3.      | Estrutura do Trabalho                                 | 18        |
| <b>2.</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b>                          | <b>20</b> |
| 2.1.      | Impactos na Rede de Distribuição                      | 20        |
| 2.2.      | Inversores Inteligentes                               | 21        |
| <b>3.</b> | <b>METODOLOGIA</b>                                    | <b>23</b> |
| 3.1.      | Funções de Controle                                   | 23        |
| 3.1.1.    | Função Volt-Watt                                      | 23        |
| 3.1.2.    | Função Volt-VAr                                       | 24        |
| 3.2.      | Métricas de Desempenho                                | 26        |
| 3.3.      | Algoritmos Evolucionários                             | 26        |
| 3.4.      | <i>Software</i> Utilizado no Trabalho                 | 29        |
| <b>4.</b> | <b>SISTEMAS TESTE E FOTOVOLTAICO NO OPENDSS</b>       | <b>30</b> |
| 4.1.      | Rede Teste IEEE 123 Barras                            | 30        |
| 4.2.      | O Sistema Fotovoltaico                                | 31        |
| 4.2.1.    | Parametrização das Curvas de Irradiação e Temperatura | 33        |
| 4.2.2.    | Parametrização da Curva XY                            | 33        |
| 4.2.3.    | Parametrização do Sistema Fotovoltaico no OpenDSS     | 34        |
| 4.3.      | Curvas de Carga                                       | 35        |
| <b>5.</b> | <b>AJUSTE DO ALGORITMO GENÉTICO NO PYTHON</b>         | <b>37</b> |
| 5.1.      | Representação das soluções potenciais                 | 37        |
| 5.2.      | População Inicial                                     | 37        |
| 5.3.      | Função Objetivo                                       | 38        |
| 5.4.      | Operadores Genéticos                                  | 39        |
| 5.4.1.    | Seleção   | 39        |
| 5.4.2.    | Recombinação  | 40        |
| 5.4.3.    | Mutação   | 40        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.4.4. Parâmetros do Algoritmo Genético .....   | 41        |
| 5.4.5. Tamanho da População .....   | 41        |
| 5.4.6. Número de gerações .....   | 41        |
| <b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>  | <b>42</b> |
| 6.1. Condições de simulação .....   | 42        |
| 6.1.1. Circuito IEEE 123 barras .....   | 43        |
| 6.1.2. Circuito IEEE 123 barras com sistema fotovoltaico com inversor inteligente sem<br>otimização ..... | 44        |
| 6.1.3. Circuito IEEE 123 barras com sistema fotovoltaico com inversor inteligente e<br>otimização .....   | 45        |
| <b>7. CONCLUSÕES .....</b>  | <b>51</b> |
| REFERÊNCIAS.....  | 52        |
| <b>APÊNDICE A – Algoritmo Genético em Python.....</b>   | <b>55</b> |
| <b>APÊNDICE B – Função suporte para implementar o sistema fotovoltaico .....</b>                          | <b>61</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da utilização de recursos energéticos tem contribuído para o crescimento dos impactos ambientais em todo o planeta, uma vez que a grande parte da matriz energética mundial é composta por fontes de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural (EPE, 2022).

A utilização em demasia dessas fontes de energia não renováveis tem contribuído para a crescente preocupação com os impactos ambientais no planeta e com o crescimento sustentável dos diversos ramos das atividades econômicas. Assim, no decorrer das últimas décadas, começaram a serem incentivadas formas alternativas para se produzir energia elétrica de uma maneira mais limpa por meio de fontes renováveis.

Entre os exemplos mais conhecidos para se produzir energia elétrica limpa estão: eólica, solar fotovoltaica, maremotriz, geotérmica e a proveniente da combustão dos biocombustíveis. Entre elas, a energia solar tem se destacado pela sua expansão no volume de capacidade instalada no decorrer dos anos devido, principalmente, aos avanços tecnológicos e incentivos governamentais.

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a potência instalada no Brasil passou de 2,45 GW, em 2018, para 30,62 GW em 2023 (ABSOLAR, 2023). Esses dados mostram uma forte adesão da geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos no país, fazendo com que essa fonte de energia passasse a representar cerca de 14,3% da matriz elétrica brasileira, no primeiro semestre de 2023.

Os recursos energéticos distribuídos, do Inglês *Distributed Energy Resources* (DER), de acordo com a Comissão Australiana de Mercado de Energia, referem-se a pequenas unidades geradoras de energia elétrica como os painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, motores alternativos e armazenamento de baterias, que geralmente estão localizadas na circunscrição do medidor de energia elétrica do consumidor.

Os DERs geralmente estão relacionados à independência energética dos consumidores em relação à rede de distribuição ao permitir a geração e gestão da energia elétrica pelo usuário. O emprego desses dispositivos permite que a energia elétrica seja produzida geograficamente próxima aos centros consumidores,

contribuindo para reduzir a demanda das redes de distribuição e transmissão, além de diminuir as perdas técnicas do sistema (Tonkoski; Lopes; El-Fouly, 2011).

Contudo, o emprego em demasia dos DERs pode ocasionar um aumento da tensão para o sistema de distribuição, além de causar impactos no funcionamento dos reguladores de tensão, bancos de capacitores e no sistema de proteção da rede ao causar fluxo reverso de potência (EPRI, 2017). Outro problema que pode surgir com a implementação em grande escala desses dispositivos é o mascaramento das cargas, uma vez que muitos dos DERs não são monitorados e uma eventual desconexão sem o conhecimento da concessionária de energia pode impactar no projeto e operação da rede de distribuição (Seguin *et al.*, 2016).

Essa limitação da rede é denominada de Capacidade de Hospedagem. A Capacidade de Hospedagem é a medida da quantidade máxima de DERs que podem ser acomodados em uma determinada rede sem que haja a necessidade de investimentos para remediar a violação de limites de tensão e qualidade da energia (EPRI, 2017).

As concessionárias que administram as redes de distribuição utilizam diversos mecanismos para controlar a tensão, de modo a garantir o padrão de qualidade de energia elétrica aos consumidores. Entre as técnicas e equipamentos mais tradicionais do setor estão o transformador com comutação automática de tape, do inglês, *On-load tap changer* (OLTC), e os bancos de capacitores fixos e chaveados, geralmente instalados próximos de grandes cargas indutivas que estão conectadas à rede.

O aumento da quantidade de DERs acoplados ao sistema de distribuição contribui para o aumento da tensão, impactando no funcionamento dos dispositivos reguladores, uma vez que há limitação na capacidade de manobra, o que resulta em um tempo de resposta lento. Além disso, no caso de um sistema fotovoltaico, por exemplo, não há coincidência entre a produção máxima de energia e o instante que as cargas consomem suas demandas máximas, intensificando o problema.

Segundo o padrão IEEE 1547 (IEEE, 2018), o DER deve ser capaz de regular a tensão e a potência ativa de saída através do consumo ou injeção de potência reativa, a fim de mitigar alguns dos impactos diversos sem que haja a necessidade de melhorar a estrutura da rede elétrica. Para atender a essa recomendação, são instalados juntos aos DERs um equipamento denominado inversor inteligente. O inversor é um dispositivo eletrônico que transforma corrente contínua em alternada,

cujas funções inteligentes permitem ajustar a tensão de saída de duas maneiras diferentes: controlando o consumo/injeção de potência reativa na rede; e reduzindo o valor da potência ativa fornecida.

A utilização das funções inteligentes dos inversores em conjunto com os sistemas fotovoltaicos permite aumentar a penetração de DERs em um determinado sistema de distribuição, sem a necessidade de melhorar a estrutura da rede, de modo a atuar em conjunto com o sistema de controle Volt-VAr da concessionária a fim de ajudar a gerenciar a tensão e os fluxos de potência reativa no sistema (EPRI, 2017).

### **1.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a efetividade da função inteligente Volt-VAr na minimização dos impactos decorrentes do alto nível de penetração dos sistemas fotovoltaicos em uma rede de distribuição de energia elétrica.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Modelar e simular as funções inteligentes Volt-VAr e Volt-Watt dos inversores no *software* OpenDSS mediante o uso de diferentes curvas de demanda horária aplicadas à rede de teste de 123 barras do IEEE (IEEE, 2014).

- Encontrar o melhor ajuste padronizado da curva da função inteligente Volt-VAr de um inversor por meio de um algoritmo genético, a fim de mitigar o impacto causado pela alta penetração de sistemas fotovoltaicos em uma rede de distribuição de energia elétrica.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

Na seção 1 é realizada a introdução do tema abordado e quais são os objetivos a serem atingidos com esse trabalho.

Na seção 2 é realizada uma revisão da literatura a fim de identificar os impactos da alta penetração dos sistemas de geração distribuída na rede de distribuição.

Na seção 3 apresenta-se a metodologia adotada nesse trabalho, abordando as funções de controles utilizadas e a técnica que será utilizada para otimizar essas funções.

Na seção 4 é demonstrada a modelagem da rede de teste IEEE 123 barras do IEEE no *software* OpenDSS, abordando a sua parametrização.

Na seção 5 apresenta-se a implementação do algoritmo genético utilizado para otimizar as curvas das funções inteligentes dos inversores.

Na seção 6 são abordados os resultados e as discussões da implementação do algoritmo genético para a rede de teste IEEE 123 barras.

Na seção 7, apresentam-se as conclusões obtidas nesse trabalho.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Nessa seção são abordados os principais estudos relacionados aos impactos da geração distribuída conectada circuito e o emprego dos inversores inteligentes no controle dos recursos energéticos distribuídos.

### 2.1. Impactos na Rede de Distribuição

Segundo Walling *et al.* (2008) os sistemas de distribuição tradicionais são concebidos tendo a subestação como sendo a única fonte para alimentar toda a rede. Quando os sistemas fotovoltaicos estão conectados em áreas residenciais pequenas que compartilham o mesmo transformador, eles podem reduzir a queda de tensão, contribuindo para que haja um aumento dessa tensão para os demais usuários.

De acordo com o Sunderman, Dugan e Smith (2014) a natureza intermitente da geração solar fotovoltaica devido à passagem de nuvens pode vir a aumentar a operação de equipamentos reguladores de tensão e bancos de capacitores do sistema de distribuição, impactando na diminuição do tempo de vida útil desses equipamentos. Além disso, a natureza variável desse tipo de geração também pode ocasionar problemas de operação em cargas, equipamentos e outros sistemas fotovoltaicos, devido ao impacto da tensão no secundário do transformador da rede de distribuição.

Para Freitas (2020), quando a potência gerada pelos sistemas fotovoltaicos é maior que a potência drenada pelos dispositivos, há uma sobrecarga durante o funcionamento dos equipamentos conectados à rede. Esse fenômeno da sobrecarga pode vir a ser intensificado com uma maior penetração dos sistemas fotovoltaicos, quando os equipamentos que regulam a tensão não estão projetados para suportar os dispositivos fotovoltaicos, a geração intermitente, entre outros motivos.

Segundo Tonkoski *et al.* (2011) a alta penetração de sistemas fotovoltaicos na rede de distribuição, aliada a uma grande geração de energia em local cujas cargas apresentam uma demanda baixa, pode causar um fluxo de potência reverso no sistema. Geralmente os dispositivos reguladores de tensão são projetados para serem unidirecionais devido a característica radial do sistema, assim, um fluxo reverso de potência pode vir a acionar os sistemas de proteção dos reguladores.

De acordo com Seguin *et.al.* (2016) os sistemas fotovoltaicos podem impactar as operações de um determinado circuito devido ao mascaramento das cargas que estão acopladas nele, pois, o dimensionamento de um sistema de distribuição é feito com base no total de cargas que precisam ser supridas. Contudo a medição da quantidade de cargas pode ser aparentemente menor quando há a operação de DER no circuito. Assim, a falta de monitoramento da quantidade e funcionamento de DER impossibilita a distribuidora de energia saber se o sistema fotovoltaico foi desconectado ou está ausente, podendo gerar risco de sobrecarga no circuito.

Para EPRI (2017) a presença de geração distribuída ao longo do sistema de distribuição, que foi projetado para suprir as demandas das cargas do circuito através da subestação, contribui para aumentar a potência injetada. Assim, com a injeção de potência ativa no circuito, o sistema sofre uma sobretensão.

## **2.2. Inversores Inteligentes**

O inversor é o dispositivo eletrônico que transforma a corrente contínua em alternada e é considerado um dos principais equipamentos utilizados para conectar um DER à rede de distribuição, podendo ser empregado em sistemas fotovoltaicos, sistemas de armazenamento de energia e geradores eólicos. O inversor inteligente é o equipamento capaz de ajustar a tensão do DER de duas maneiras: controlando o consumo/injeção de potência reativa na rede; e/ou reduzindo o valor da potência ativa fornecida.

Segundo Gush *et. al.* (2021), os impactos observados na rede de distribuição, como o aumento da tensão decorrente da alta penetração de sistemas fotovoltaicos, contribui para limitar o número desses equipamentos que podem ser implementados. Assim, por mais que as reconfigurações das redes de distribuição e o emprego dos controladores de tensão melhorem a capacidade de hospedagem do circuito, há a recomendação de o próprio DER ser capaz de participar ativamente na regulação da frequência e tensão por meio de um inversor inteligente.

De acordo com Tonkoski (2011), para aumentar a capacidade de hospedagem de um sistema de distribuição, o mais indicado é que o inversor inteligente instalado junto à geração solar fotovoltaica seja capaz de absorver a potência reativa ou limitar a potência ativa da geração distribuída, uma vez que a robustez dos mecanismos que

as concessionárias de energia utilizam para regular a tensão do sistema apresentam uma limitação da capacidade de manobra.

Para Rylander *et. al.* (2016) as funções inteligentes dos inversores podem aumentar a capacidade de hospedagem dos sistemas fotovoltaicos de maneira diferente, conforme as características de cada alimentador. Contudo, o método de controle Volt-VAr apresenta o mais efetivo uso da potência reativa, pois pode operar de maneira indutiva ou capacitiva.

### 3. METODOLOGIA

A regulação da tensão de saída de um sistema fotovoltaico feito por um inversor inteligente é realizada através das funções de controle desse dispositivo. Cada função de controle tem uma determinada característica de funcionamento ao regular a tensão no ponto de conexão do dispositivo.

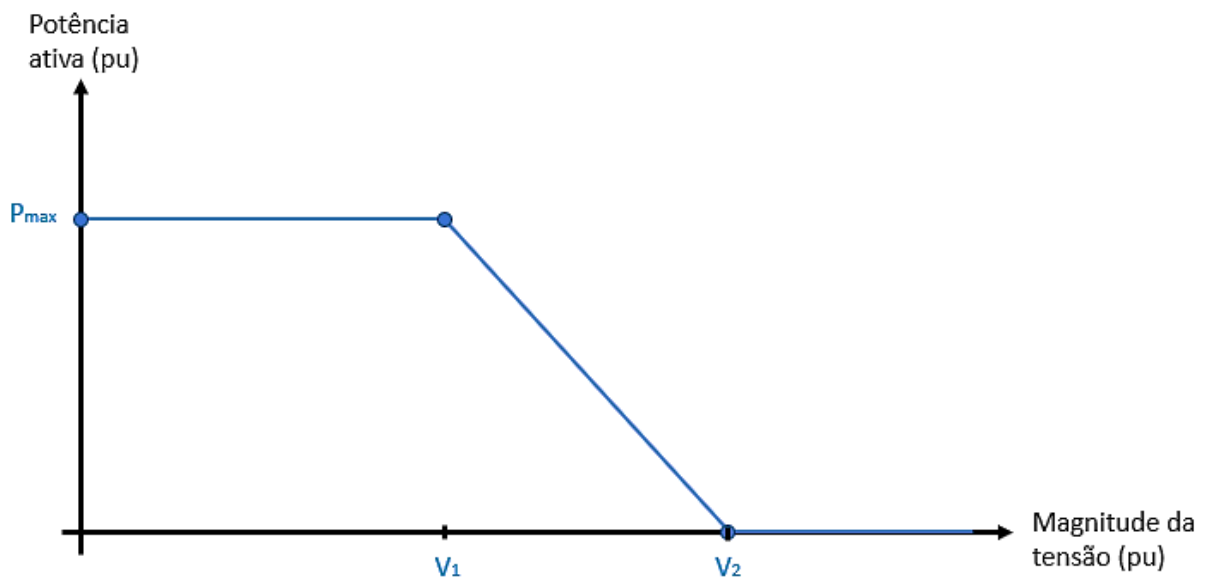
#### 3.1. Funções de Controle

As funções de controle de um inversor inteligente são responsáveis por avaliar uma variável de entrada como a tensão, e com base na característica da curva, prover um controle da tensão, potência ativa ou reativa de saída.

##### 3.1.1. Função Volt-Watt

A função de controle Volt-Watt pode atuar na limitação da produção de potência ativa de um sistema fotovoltaico, quando a tensão medida no ponto de conexão estiver acima dos limites configurados no dispositivo. Na Figura 1, é ilustrada a relação dessas duas grandezas durante o funcionamento dessa função inteligente.

Figura 1 – Curva da função de controle Volt-Watt



Fonte: Adaptado de (Freitas, 2020)

Para valores de tensão abaixo de  $V_1$  o inversor inteligente permite que a potência ativa de saída seja a máxima produzida pelo sistema fotovoltaico. Para valores de tensão de  $V_1$  a  $V_2$  a potência ativa de saída é linearmente reduzida pelo inversor. Quando é medida uma tensão acima de  $V_2$ , a saída de potência ativa é zerada.

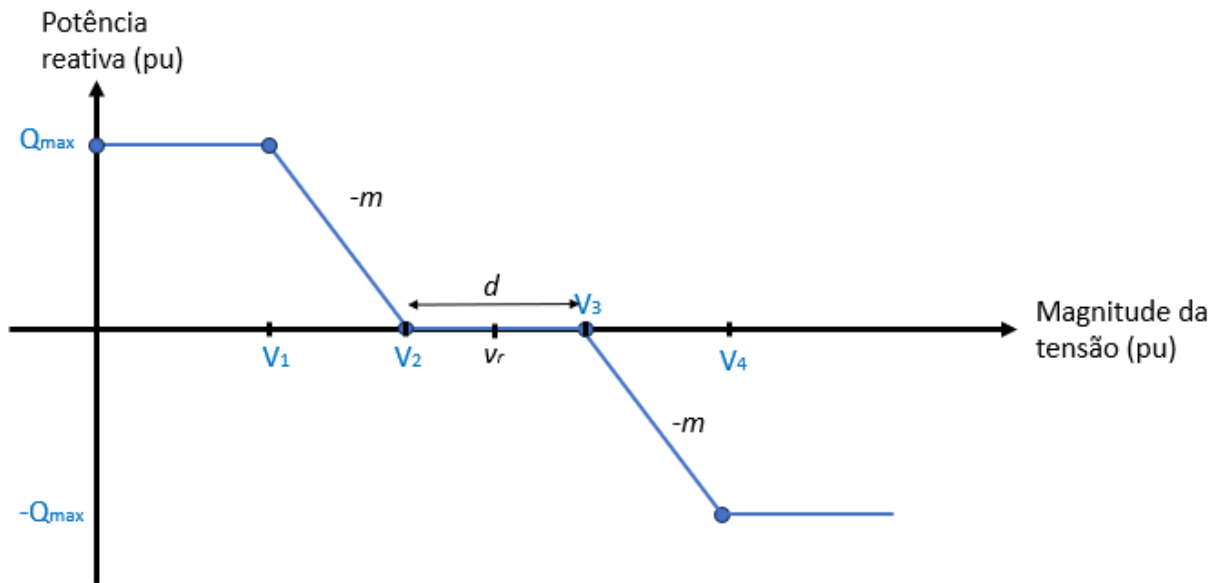
A função de controle Volt-Watt atua para limitar a potência ativa de saída com o intuito de evitar o aumento da tensão, ou seja, é indicada quando há uma alta geração por um sistema fotovoltaico e uma baixa demanda de consumo ou falta de equipamentos reguladores de tensão (FREITAS, 2020).

Como esse modo de controle deve atuar apenas para limitar os níveis de tensão excessiva, os seus parâmetros devem ser configurados de maneira cuidadosa a fim de evitar uma limitação frequente da produção de potência ativa pelo inversor (EPRI, 2017).

### **3.1.2. Função Volt-VAr**

A função de controle Volt-VAr atua para fornecer ou absorver a potência reativa de saída do inversor com base na leitura da tensão no ponto de conexão. Na Figura 2, mostra-se a relação entre a tensão monitorada em pu no eixo das abcissas e o valor em pu da potência reativa no eixo das ordenadas. Por convenção, os valores positivos para o eixo y indicam o fornecimento de potência reativa (comportamento capacitivo), enquanto valores negativos representam a absorção dessa potência (comportamento indutivo).

Figura 2 – Curva da função de controle Volt-VAr



Fonte: Adaptado de (Gush, 2021)

Para valores de tensão abaixo de  $V_2$  o inversor opera de maneira capacitiva fornecendo potência reativa ao sistema a fim de aumentar o valor da tensão. Quando o valor da tensão é menor que  $V_1$ , o inversor é capaz de fornecer 100% da potência reativa disponível. Entre as tensões  $V_2$  e  $V_3$  o inversor se encontra na zona morta ( $d$ ) e não fornece e nem absorve potência reativa. Para valores de tensão maiores que  $V_3$ , o inversor opera de maneira indutiva, absorvendo a potência reativa a fim de diminuir a tensão.

Conforme a tensão aumenta de  $V_1$  para  $V_2$  a quantidade de potência reativa disponível que o inversor fornece ao ponto de conexão diminui a uma taxa  $m$ . De maneira análoga, conforme a tensão aumenta de  $V_3$  para  $V_4$ , a quantidade de potência reativa disponível que o inversor absorve aumenta a uma taxa  $m$ .

A função de controle Volt-VAr atua de maneira ativa para manter os valores da tensão no barramento do sistema fotovoltaico dentro dos limites aceitáveis a partir da configuração dos parâmetros do inversor inteligente (FREITAS, 2020).

Como esse modo de controle atua com base na tensão medida no ponto de conexão e na potência reativa de saída, o inversor acaba operando de maneira independente da produção de potência ativa, assim, o dispositivo consegue produzir uma maior redução de tensão, quando for medido um valor alto de tensão no barramento (EPRI, 2017).

### 3.2. Métricas de Desempenho

O desempenho das funções controle dos inversores inteligentes na regulação da tensão da rede de distribuição no ponto de conexão do sistema fotovoltaico é calculado pelo desvio de tensão, dado por (1).

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T |1 - V_{n,t}| \quad [\text{V}] \quad (1)$$

Em que  $V_{n,t}$  é a tensão no nó  $n$  de cada barramento no instante  $t$ .  $T$  corresponde à quantidade de passos de tempo do período analisado e  $N$  é o número de barramentos do sistema.

Outra métrica a ser analisada é faixa de tensão no ponto de conexão no período da simulação, dada por (2).

$$\delta = V_{max} - V_{min} \quad [\text{V}] \quad (2)$$

Sendo os valores  $V_{max}$  e  $V_{min}$  os valores máximo e mínimo das tensões de fase.

No Brasil, o módulo 8 das Regras e Procedimentos de Distribuição (PRODIST, 2021) estabelecido pela resolução normativa nº 1.000/2021 da ANEEL regulamenta a faixa adequada de Tensão de Leitura (TL) entre 0,93 e 1,05 para a tensão nominal igual ou superior a 2,3 kV e menor que 69 kV.

### 3.3. Algoritmos Evolucionários

O termo Algoritmo Evolucionário (AE) é considerado um conceito amplo e inspirado na ideia de seleção natural dos indivíduos de uma população, conceito originalmente definido por Charles Darwin. Essa técnica consiste em selecionar entre um conjunto de possíveis soluções aquela que melhor otimiza um dado problema. Para atingir esse objetivo, o algoritmo evolucionário faz uma série de sucessivas seleções, recombinações e mutações de uma solução candidata até que haja uma convergência para uma solução ótima no decorrer das gerações.

Um algoritmo evolucionário também pode ser definido como uma categoria que engloba subvariantes como algoritmos genéticos, computação evolucionária, estratégias de evolução, entre outros. Nesses casos, o emprego de funções objetivo auxilia na avaliação das características das soluções candidatas e na determinação da mais adequada a ser selecionada (CHIPPERFIELD; FLEMING, 1996).

Para Coello *et. al.* (2002), precisam-se das seguintes condições para simular um problema evolutivo em um computador:

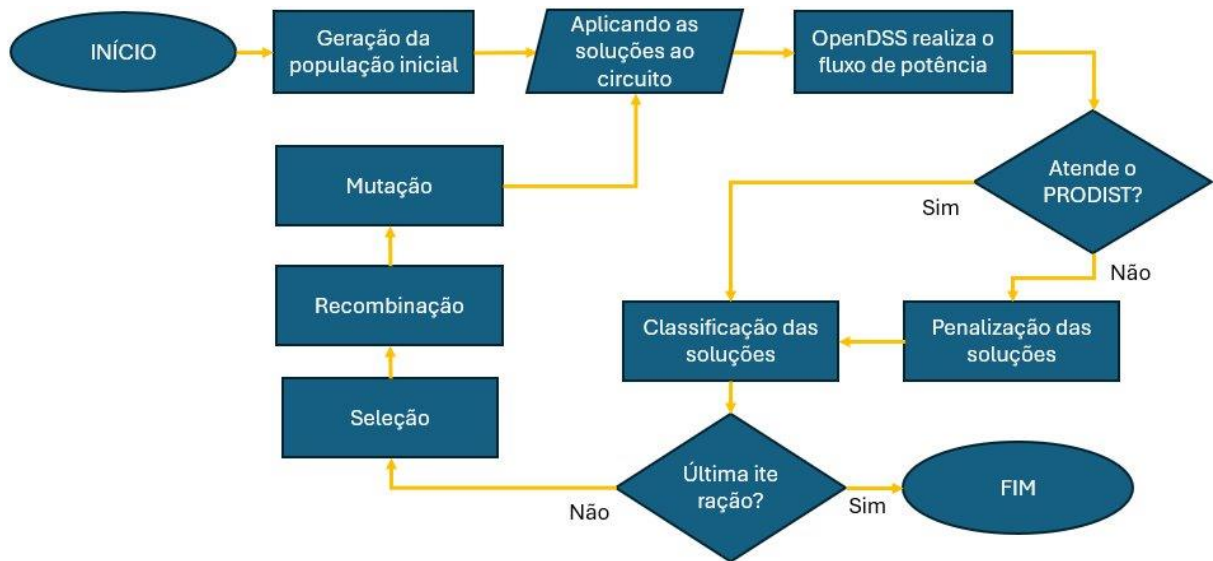
- Uma representação de soluções potenciais para o problema;
- Uma maneira de criar uma população inicial de soluções potenciais;
- Uma função de avaliação que desempenha o papel do meio ambiente e, soluções de elite em termos de sua “adequação”;
- Operadores genéticos que alteram a composição da prole gerada, normalmente, recombinação e mutação;
- Valores para vários parâmetros que o algoritmo evolutivo usa (tamanho da população, probabilidades de aplicação de operadores genéticos, entre outros fatores).

Para definir formalmente um AE, seu modelo básico é descrito em termos matemáticos, permitindo a especificação exata dos vários parâmetros do AE. Nesta estrutura, cada AE está associado a um conjunto não vazio  $I$  de espaço dos indivíduos. Cada indivíduo  $a \in I$  normalmente representa uma solução candidata para o problema que está sendo resolvido. Os indivíduos são frequentemente representados como um vetor ( $a$ ), onde as dimensões do vetor são análogas aos genes de um cromossomo. Além disso, um indivíduo é modificado conforme necessário pelas instâncias do AE.

Ao definir transformações populacionais, ou geracionais, Bäck (1996) denota a coleção resultante de  $\mu$  indivíduos via  $I^\mu$ , e denota transformações populacionais pela seguinte relação:  $T: I^\mu \rightarrow I^\mu$ , onde  $\mu \in \mathbb{N}$ . No entanto, algumas variantes do AE obtêm populações resultantes cujo tamanho não é igual ao de seus predecessores. Assim, esta estrutura geral representa uma transformação populacional por meio da relação  $T: I^\mu \rightarrow I^{\mu'}$ , indicando que populações sucessivas podem conter o mesmo ou diferentes números de indivíduos. Esta estrutura também representa todos os tamanhos de população, operadores evolutivos e parâmetros como sequências. Dessa forma, um AE é definido como (Coello *et al.*, 2002):

Definição do Algoritmo Evolucionário: Seja  $I$  um conjunto não vazio do espaço de indivíduos,  $\{\mu^{(i)}\}_{i \in \mathbb{N}}$  uma sequência em  $\mathbb{Z}^+$  dos tamanhos da população pai,  $\{\mu'^{(i)}\}_{i \in \mathbb{N}}$  a sequência em  $\mathbb{Z}^+$  dos tamanhos da população descendente,  $\Phi: I \rightarrow \mathbb{R}$  uma função de aptidão,  $\iota: \cup_{i=1}^{\infty} (I^{\mu})^{(i)} \rightarrow \{\text{verdadeiro}, \text{falso}\}$  o critério de parada,  $\chi \in \{\text{verdadeiro}, \text{falso}\}$ ,  $r$  uma sequência  $\{r^{(i)}\}$  de operadores de recombinação  $r^{(i)}: \mathbb{X}_r^{(i)} \rightarrow \mathcal{T}(\Omega_r^{(i)}, \mathcal{T}(I^{\mu^{(i)}}, I^{\mu'^{(i)}}))$ ,  $m$  uma sequência  $\{m^{(i)}\}$  dos operadores de mutação  $m^{(i)}: \mathbb{X}_m^{(i)} \rightarrow \mathcal{T}(\Omega_m^{(i)}, \mathcal{T}(I^{\mu^{(i)}}, I^{\mu'^{(i)}}))$ ,  $s$  uma sequência  $\{s^{(i)}\}$  dos operadores de seleção  $s^{(i)}: \mathbb{X}_s^{(i)} \times \mathcal{T}(I, \mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{T}(\Omega_s^{(i)}, \mathcal{T}(I^{\mu'^{(i)} + \chi \mu^{(i)}}, I^{\mu^{(i+1)}}))$ ,  $\theta_r^{(i)} \in \mathbb{X}_r^{(i)}$  os parâmetros de recombinação,  $\theta_m^{(i)} \in \mathbb{X}_m^{(i)}$  os parâmetros de mutação e  $\theta_s^{(i)} \in \mathbb{X}_s^{(i)}$  os parâmetros de seleção. Então, o algoritmo mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma de um algoritmo evolucionário



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4. Software Utilizado no Trabalho

O *software* escolhido para realizar as simulações das redes elétricas no decorrer desse trabalho foi o *Open Distribution System Simulator* – OpenDSS, desenvolvido pelo *Electric Power Research Institute* – EPRI. A ferramenta permite modelar, simular e analisar redes elétricas com diversas características e configurações, além de suportar a integração de recursos energéticos distribuídos.

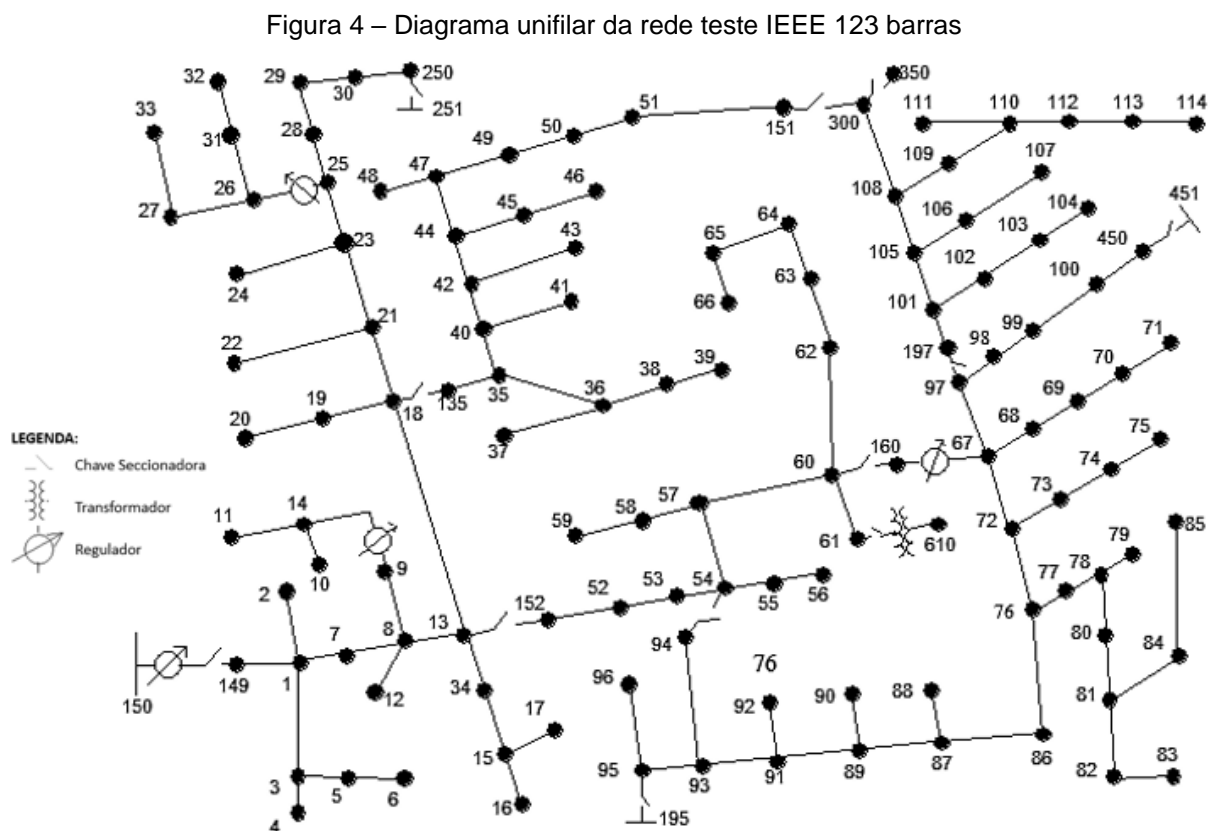
O OpenDSS é um *software* de código livre e aberto considerado popular entre as empresas distribuidoras de energia elétrica, universidades e laboratórios, após a ANEEL adotá-lo como principal ferramenta para o cálculo de perdas técnicas regulatórias, conforme Nota Técnica nº 057/2014-SRD/ANEEL (ANEEL, 2014).

#### 4. SISTEMAS TESTE E FOTOVOLTAICO NO OPENDSS

Para simular as diferentes curvas de demanda horária e analisar o fluxo de potência, é modelado e implementado uma rede de teste do IEEE no *software* OpenDSS. Também são modelados e parametrizados os sistemas de geração distribuída utilizando os sistemas fotovoltaicos.

##### 4.1. Rede Teste IEEE 123 Barras

A rede teste IEEE 123 barras foi proposta inicialmente para ser utilizada em testes e comparações de algoritmos na solução de sistemas radiais trifásicos com cargas desbalanceadas. Trata-se de uma rede com um número reduzido de barras, mas bastante carregada, composto por linhas trifásicas aéreas e subterrâneas, regulador de tensão, capacitor *shunt* e cargas localizadas e distribuídas. O diagrama unifilar dessa rede de distribuição é mostrado na Figura 4.



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2014).

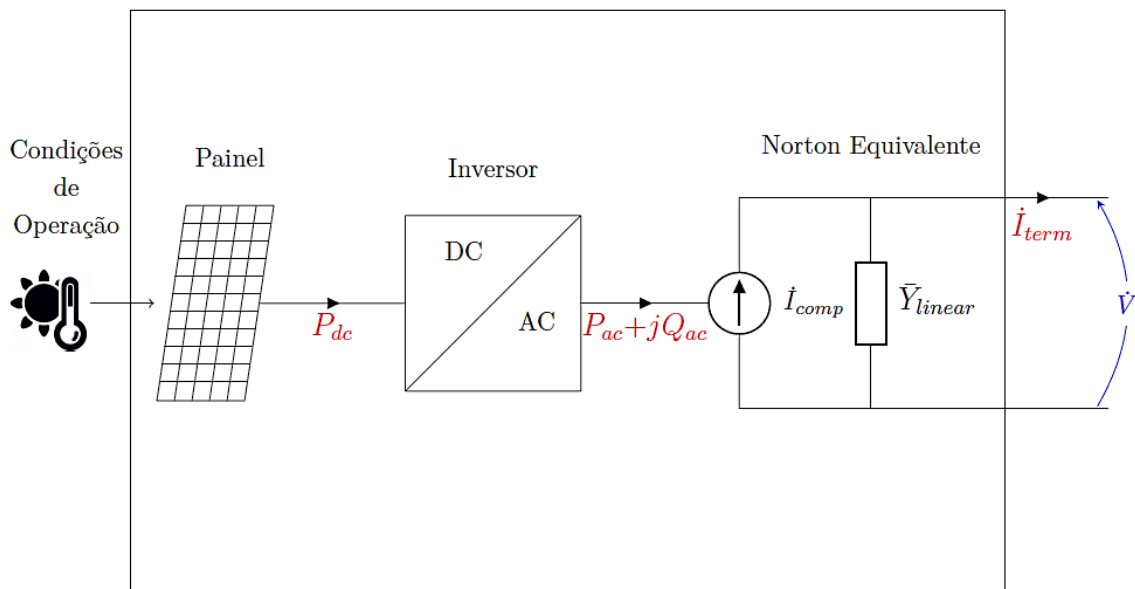
O circuito contém ainda chaves seccionadoras e transformadores com diferentes capacidades e configurações. A rede opera em múltiplos níveis de tensão, com a subestação principal tipicamente operando em 115 kV, que é rebaixada para níveis de distribuição na faixa dos 4,16 kV na média tensão, e na faixa dos 480 V, na baixa tensão.

O sistema de 123 barras da rede de teste proposta pelo IEEE contém um total de 85 cargas que simulam as unidades consumidoras residenciais, comerciais e industriais.

## 4.2. O Sistema Fotovoltaico

No *software* OpenDSS o sistema fotovoltaico é constituído por um gerador fotovoltaico e um inversor, como ilustrado na Figura 5. É assumido que o inversor seja capaz de encontrar o ponto de máxima transferência de potência do painel fotovoltaico ( $P_{mp}$ ) de maneira rápida devido ao seu tempo de simulação não ser inferior a 1 segundo (EPRI, 2020).

Figura 5 – Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico implementado pelo software OpenDSS



Fonte: Adaptado de (Freitas, 2020).

Para definir este sistema fotovoltaico no *software* OpenDSS é necessário modelar os seus elementos constitutivos, ou seja, os dados do painel, os dados do inversor e as condições em que o sistema deve operar. A potência entregue pelo painel fotovoltaico ( $P_{dc}$ ) pode ser definida por (3).

$$P_{dc}(t) = P_{mp} \cdot \alpha \cdot \alpha(t) \cdot F_c(T(t)) \quad [kW] \quad (3)$$

Em que:

- $P_{mp}$ : É o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico, quando o componente opera a uma temperatura de 25 °C e uma irradiação de 1,0kW/m<sup>2</sup>;
- $\alpha$ : Radiação de base dada em unidades de kW/m<sup>2</sup>;
- $\alpha(t)$ : Valor da curva de radiação no passo de tempo t;
- $F_c(T(t))$ : Fator de correção de potência do painel fotovoltaico em função da Temperatura(t);
- $T(t)$ : Valor da curva de temperatura no passo de tempo t.

O valor da potência ativa de saída do sistema fotovoltaico pode ser calculado por meio de (4).

$$P_{saída}(t) = P_{dc} \cdot eff(P_{saída}(t)) \quad [kW] \quad (4)$$

Em que  $eff(P_{saída}(t))$  é a eficiência do inversor para uma determinada potência de saída.

Comumente os inversores acoplados aos DERs são configurados para operar com o fator de potência unitário, a fim de gerar a máxima potência ativa e a mínima potência reativa possível durante a sua operação. Contudo, nos casos em que há uma sobretensão causada pelo sistema fotovoltaico, o inversor pode ser configurado para operar com um fator de potência não unitário, de modo a absorver potência reativa e reduzir a tensão. O modo de controle *Volt-VAr* do inversor é um modo de operação em que o equipamento controla a potência reativa entregue no ponto de conexão com o sistema, conforme mencionado na seção 3.1.2.

A modelagem dos parâmetros do sistema fotovoltaico implementado no *software* OpenDSS, descrito nas seções a seguir, é indicado por EPRI (2020).

#### 4.2.1. Parametrização das Curvas de Irradiação e Temperatura

Para realizar as simulações através do *software* OpenDSS é necessário realizar a parametrização das curvas de irradiação e temperatura do sistema fotovoltaico. As curvas de irradiação e temperatura são compostas por um total de 24 pontos cada uma, em que cada um desses pontos corresponde a um valor de irradiação e de temperatura para uma respectiva hora do dia.

No *software*, as curvas de irradiação e temperatura podem ser definidas, respectivamente, com o uso dos objetos *loadshape* e *tshape*.

- Curva de Irradiação para cada hora do dia em código do OpenDSS.

```
New Loadshape.Irrad npts=24 interval=1
~ mult = [0 0 0 0 0 0 0.1 0.2 0.3 0.5 0.8 0.9 1.0 1.0 0.99 0.9 0.7 0.4 0.1 0 0 0 0 0]
```

- Curva de Temperatura para cada hora do dia em código do OpenDSS.

```
New Tshape.Temp npts=24 interval=1
~ temp = [25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 35, 40, 45, 50, 60, 60, 55, 40, 35, 30, 25,
25, 25, 25, 25, 25]
```

#### 4.2.2. Parametrização da Curva XY

No *software* OpenDSS um sistema fotovoltaico é composto por duas curvas XY distintas, a primeira descreve o comportamento do ponto de máxima potência ( $P_{mp}$ ) do painel fotovoltaico em função da sua temperatura, enquanto a segunda curva descreve qual a eficiência do inversor para uma determinada potência ativa fornecida.

Para a primeira curva XY, o ponto de máxima potência ( $P_{mp}$ ) é alcançado quando o painel opera em sua condição normal de temperatura, ou seja 25°C. À medida que a temperatura do painel aumenta, o seu funcionamento é afetado, diminuindo a potência que o painel consegue produzir. Já para a segunda curva XY, quando a potência ativa fornecida é de 1,0 pu, a eficiência do inversor é de 97%.

- Curva XY que relaciona o ponto de máxima potência ( $P_{mp}$ ) e a temperatura.

```
New XYCurve.PvsT npts=4
~ xarray = [0 25 75 100] yarray = [1.2 1.0 0.8 0.6]
```

- Curva XY que relaciona a potência ativa fornecida e a eficiência do inversor.

```
New XYCurve.Eff npts=4
~ xarray = [0.1 0.2 0.4 1.0] yarray = [0.86 0.90 0.93 0.97]
```

#### 4.2.3. Parametrização do Sistema Fotovoltaico no OpenDSS

A parametrização do sistema fotovoltaico no *software* OpenDSS é feita através da definição do objeto *PVSystem*. Esse sistema é conectado em um transformador de serviço que, por sua vez, é conectado à rede. O transformador de serviço é responsável por adequar a tensão de 480 V na saída do sistema fotovoltaico com a tensão do barramento da rede de distribuição.

O transformador é trifásico e apresenta uma potência de 500 kVA, a fim de que fique compatível com o inversor inteligente, que também apresenta uma potência nominal no seu ponto de máxima potência de 400 kW, enquanto a sua potência aparente nominal é de 500 kVA, e opera apenas quando a potência de saída do painel fotovoltaico for maior que 10%. Seu fator de potência é unitário.

- Implementação do sistema fotovoltaico em código do OpenDSS.

```
New PVSystem.PV phases=3 bus1=bus_trafo kV=0.48 kVA=500 irrad=.98
~ Pmpp=400 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1 effcurve=eff
~ P-TCurve=PvsT Daily=Irrad TDaily=Temp
```

Para a parametrização do inversor inteligente é considerado o modo de controle Volt-VAr cuja curva de controle é configurada em 4 pontos no *software* OpenDSS.

- Implementação do inversor inteligente em código do OpenDSS.

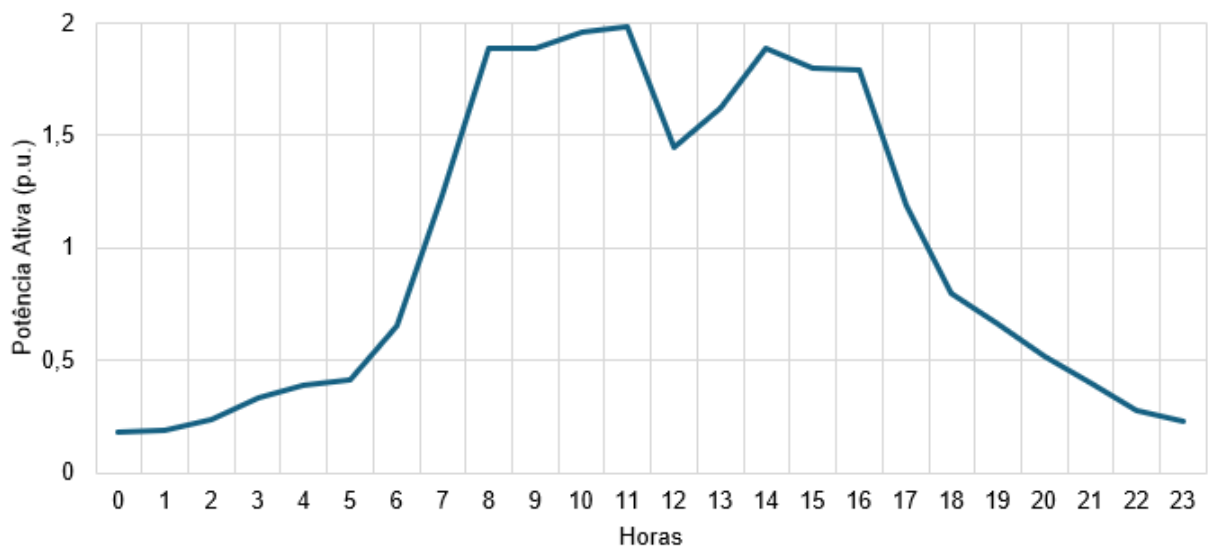
```
New XYCurve.Volt-Var npts=4 Xarray=(0.9,1.0,1.5,2.0) ~Yarray=(1.0,1.0,-1.0,-1.0)
```

```
New InvControl.InvPVCtr mode=VOLTVAR voltage_curve_ref=rated  
~vvc_curve1=VoltVarCurve
```

### 4.3. Curvas de Carga

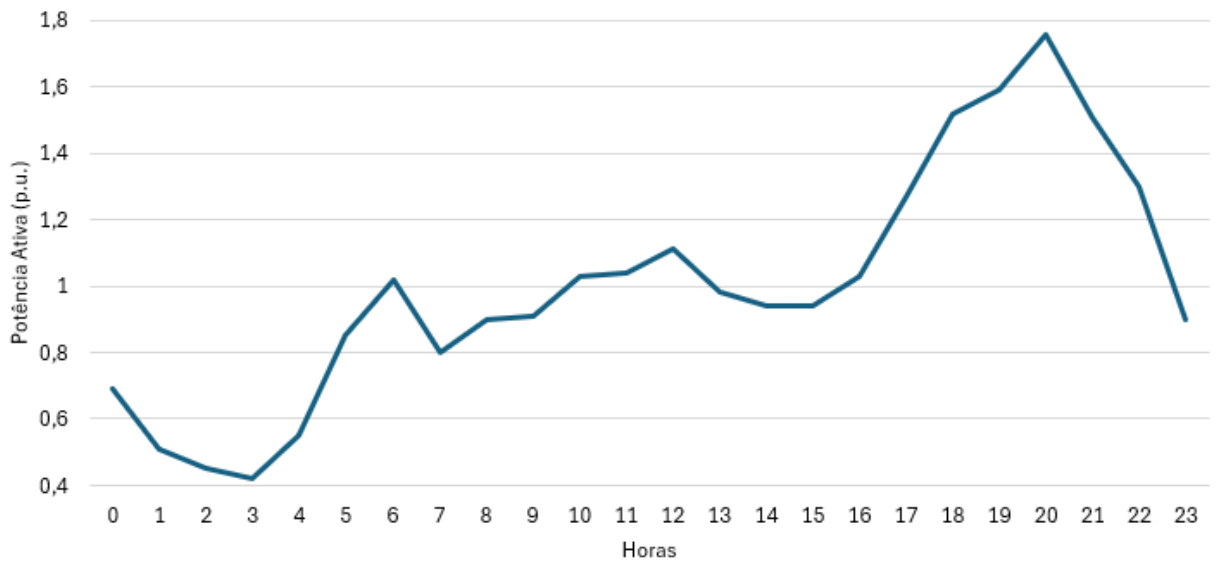
Para realizar as simulações na rede de teste IEEE 123 barras é considerado duas curvas de cargas. A primeira trata-se de uma curva de carga industrial com um consumo na faixa de 5.001 kWh a 10.000 kWh, conforme ilustrado na Figura 6. A segunda curva corresponde a uma carga residencial com um consumo na faixa de 101 kWh a 220 kWh, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 6 - Curva de carga industrial



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 - Curva de carga residencial



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5. AJUSTE DO ALGORITMO GENÉTICO NO PYTHON

Nesse trabalho, a otimização das curvas de controle da função inteligente Volt/VAr é feita através do desenvolvimento de um algoritmo evolucionário, particularmente o algoritmo genético utilizando a linguagem de programação Python 3.11, enquanto o fluxo de potência do circuito é calculado via *software* OpenDSS desenvolvido pelo EPRI. Para realizar a interface entre esses dois componentes é utilizado a biblioteca *py-dss-interface*. A simulação desse processo evolutivo em um ambiente digital é desenvolvida conforme descrito na seção 3.3.

### 5.1. Representação das soluções potenciais

Nos estudos dos algoritmos evolutivos é possível encontrar diversas abordagens para representar os cromossomos das soluções candidatas. A abordagem clássica utiliza a representação binária, mas também é possível aplicar uma representação decimal que, a depender do problema, pode ser mais rápida, além de conferir uma precisão maior (MICHALEWICS, 1996).

Nesse trabalho é utilizada uma cadeia de números no formato decimal para representar os cromossomos das soluções candidatas. Cada cromossomo contém quatro valores que representam os pontos  $V_1, V_2, V_3$  e  $V_4$  da curva de controle Volt-VAr, conforme discutido na seção 3.1.2. A escolha do formato decimal traz alguns benefícios como a precisão da representação numérica a utilização das casas decimais e a compatibilização com o software OpenDSS.

### 5.2. População Inicial

A população inicial é gerada de maneira aleatória com um intervalo de valores de zero a dois, constituídos por sete algarismos, sendo que seis deles são decimais. Uma lógica é empregada para avaliar e garantir que os valores  $V_4$  sejam maiores que os de  $V_3$ , que, por sua vez, são maiores que os de  $V_2$ , que, por fim, são maiores que os valores de  $V_1$ .

Para o algoritmo genético desse trabalho, foi arbitrada uma população inicial de 1000 indivíduos a fim de garantir um espaço amostral amplo. AS gerações seguintes, a quantidade de indivíduos é reduzida a um espaço de 500 indivíduos para que o algoritmo possa calcular e processar cada geração em um tempo menor.

### 5.3. Função Objetivo

A função objetivo é responsável por avaliar qual o impacto de cada cromossomo ao ser aplicado como solução no algoritmo genético. Também chamada de *fitness function*, ela atua como o ambiente ao realizar o papel da seleção natural, identificando e classificando os indivíduos mais aptos a serem selecionados para compor as próximas gerações.

Para realizar a avaliação da aptidão de cada indivíduo, o algoritmo genético aplica as configurações contidas em cada cromossomo no controlador do inversor inteligente instalado junto ao sistema fotovoltaico por meio da interface *py-dss-interface* controlada por Python. Em seguida, o fluxo de potência é calculado pelo *software* OpenDSS, que retorna os valores das tensões de todas as barras do circuito. Então, é realizado o cálculo dos desvios absolutos de cada barramento durante todo o período da simulação e a soma total desses desvios, conforme (1).

A partir do valor final da soma, o algoritmo genético calcula a aptidão de cada cromossomo usando (5).

$$f_{objetivo} = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T |1 - V_{n,t}| * \rho} \quad [1/V] \quad (5)$$

Onde  $\rho$  é uma penalidade aplicada conforme a avaliação do valor da tensão de leitura (TL) no nó segundo os critérios estabelecidos pelo PRODIST. Os valores de  $\rho$  foram escolhidos arbitrariamente, conforme a tabela 1, de modo que as soluções que não atendam aos critérios do PRODIST sejam mal avaliadas.

Tabela 1 - Penalidades aplicadas para cada faixa de tensão

| Faixa de tensão [V]        | Penalidade ( $\rho$ ) |
|----------------------------|-----------------------|
| $0,93 \leq TL \leq 1,05$   | 1                     |
| $0,90 \leq TL \leq 0,93$   | 100                   |
| $TL < 0,90$ ou $TL > 1,05$ | 200                   |

Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto menor for o valor do denominador, ou seja, o desvio total da tensão nos barramentos, maior é o valor da função objetivo, e maior é a aptidão do cromossomo. Ao final de todos os cálculos o algoritmo genético classifica, ranqueando os cromossomos pela sua aptidão.

#### 5.4. Operadores Genéticos

Os operadores genéticos têm o objetivo alterar a composição da prole com base na população atual, trazendo o caráter probabilístico às novas gerações de soluções candidatas. Conforme discutido na seção 3.3, os principais operadores genéticos a serem aplicados no algoritmo genético são seleção, recombinação e mutação.

##### 5.4.1. Seleção

A partir dos valores calculados da aptidão de cada cromossomo pela função objetivo, o algoritmo genético realiza a classificação dos cromossomos em ordem decrescente do mais apto ao menos apto. Assim como ocorre na natureza, os indivíduos mais aptos têm chances maiores de sobreviverem ao ambiente e de se reproduzirem, passando os seus genes para as próximas gerações.

Logo após a classificação, o algoritmo realiza a seleção dos indivíduos mais bem posicionados na classificação de aptidão. Esses cromossomos selecionados são utilizados para gerar a próxima prole. Para o algoritmo genético desse trabalho a quantidade de cromossomos selecionados é de 100 indivíduos.

### 5.4.2. Recombinação

O operador genético da recombinação é responsável por mesclar o material genético dos cromossomos selecionados, a fim de criar os indivíduos da nova geração baseados na anterior, assim como ocorre no processo da reprodução sexual na natureza.

A implementação do operador de recombinação no algoritmo genético consiste em aplicar para cada gene de cada cromossomo da nova geração o material genético dos cromossomos “pai”. Assim, para compor o gene que representa o primeiro ponto da curva Volt-VAr, ou seja, o valor de  $V_1$ , o algoritmo seleciona de maneira aleatória um cromossomo “pai” que esteja entre os melhores classificados em relação à sua aptidão e atribui o seu gene  $V_1$  ao cromossomo “filho”. Esse método é conhecido como recombinação uniforme e o algoritmo repete o mesmo procedimento a fim de popular os demais pontos da curva Volt-VAr.

Do mesmo modo em que se é gerado a população inicial, o algoritmo emprega uma lógica para garantir que os valores de  $V_1, V_2, V_3$  e  $V_4$  estejam respectivamente em ordem crescente a fim de que o *software* OpenDSS possa aplicar esses valores sem que haja problema de interpretação.

### 5.4.3. Mutação

O operador genético da mutação é responsável por trazer a variabilidade genética da prole por meio de mudanças aleatórias nos cromossomos da população. Essas mudanças beneficiam o algoritmo a fim de evitar que o programa convirja para um ótimo local ao invés da melhor otimização.

Na implementação do algoritmo genético, o operador de mutação atua para alterar o valor dos genes dos cromossomos. Essa alteração é feita por meio de uma porcentagem aleatória, que é escolhida a partir de uma faixa de valores de 0% a 2%. Por trabalhar com valores decimais, essa porcentagem de variação pode ser tanto positiva quanto negativa.

#### **5.4.4. Parâmetros do Algoritmo Genético**

Os parâmetros dos algoritmos genéticos permitem modelar a relação entre a convergência de uma solução e o custo computacional para atingir tal resultado. Definir bons parâmetros permite que o algoritmo seja mais eficiente na otimização do problema abordado.

#### **5.4.5. Tamanho da População**

O tamanho da população indica a quantidade de soluções candidatas que serão testadas no circuito e calculada a aptidão em cada iteração. Esse parâmetro do algoritmo genético influencia no espaço de busca, ou seja, na diversidade genética das soluções. Quanto menor o tamanho da população, menor a quantidade de soluções candidatas e maiores são as chances de o algoritmo convergir prematuramente para uma solução sub-ótima. Em contrapartida, um espaço de busca muito amplo impacta no processamento e nos custos computacionais.

#### **5.4.6. Número de gerações**

O número de gerações de um algoritmo genético indica a quantidade de iterações que serão calculadas, ou seja, quantas vezes os processos de seleção, recombinação e mutação serão aplicados. Quanto maior a quantidade de gerações, maior será o tempo necessário para o processamento, contudo, uma grande quantidade de gerações permite que o algoritmo explore o espaço de busca e evite a convergência prematura para uma solução sub-ótima. Para a quantidade de gerações foi escolhido arbitrariamente o valor 50.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados os resultados provenientes da aplicação do algoritmo evolucionário na otimização das curvas de controle dos inversores inteligentes inseridos no circuito de teste IEEE 123 barras, os resultados sem esses inversores inteligentes e os resultados do circuito original.

### 6.1. Condições de simulação

O período de simulação no *software* OpenDSS foi ajustado para coincidir com o ponto de máxima irradiação, ou seja, a máxima produção de energia do sistema fotovoltaico, pois nesse caso o impacto da geração distribuída é maior. Na parametrização do sistema fotovoltaico essa condição é atingida ao meio-dia (12h).

A tabela 2 traz a parametrização dos operadores genéticos utilizados na simulação do algoritmo genético.

Tabela 2 - Parametrização dos operadores genéticos do algoritmo

| <b>Operador genético</b> | <b>Parametrização</b>          |
|--------------------------|--------------------------------|
| Seleção                  | 100 melhores indivíduos        |
| Recombinação             | Aleatória dos genes            |
| Mutação                  | De 0 a 2% de maneira aleatória |
| Número de gerações       | 50                             |

Fonte: Elaborado pelo autor

Na simulação do algoritmo genético foi utilizado um computador com as seguintes configurações:

- Intel Core i5;
- CPU 1,6 GHz a 2,3 GHz;
- Memória RAM de 6 GB.

### 6.1.1. Circuito IEEE 123 barras

O primeiro fluxo de potência realizado é do circuito proposto na sua configuração original a fim de coletar os dados necessários nas comparações com os demais arranjos da rede de distribuição de 123 barras.

As informações obtidas através da simulação utilizando a curva de demanda horária com característica residencial, como as tensões máximas e mínimas e as perdas em kW são compiladas na Tabela 3.

Tabela 3 - Simulação do circuito original com curva de demanda horária residencial

| <b>Tensão máxima (p.u)</b> | <b>Tensão mínima (p.u)</b> | <b>Perdas (kW)</b> | <b>Nós críticos</b> | <b>Nós precários</b> | <b>Nós adequados</b> | <b>Tempo (ms)</b> |
|----------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 1,0437                     | 0,9825                     | 103.418,5921       | 0                   | 0                    | 278                  | 189,13            |

Fonte: Elaborado pelo autor

Para os dados da simulação utilizando a curva de demanda horária com característica industrial, as informações foram compiladas na Tabela 4

Tabela 4 - Simulação do circuito original com curva de demanda horária industrial

| <b>Tensão máxima (p.u)</b> | <b>Tensão mínima (p.u)</b> | <b>Perdas (kW)</b> | <b>Nós críticos</b> | <b>Nós precários</b> | <b>Nós adequados</b> | <b>Tempo (ms)</b> |
|----------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 1,0437                     | 0,9066                     | 395.822,9160       | 0                   | 16                   | 262                  | 162,57            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação do circuito original demonstra como a rede de distribuição nessas configurações já está no seu limite de tensão máxima segundo as exigências do PRODIST. Também é possível analisar os efeitos da curva de carga no total das perdas do circuito. Nesse caso, a curva com característica industrial, as perdas chegaram a ser 282,74% maior. Segundo a Tabela 3, todos os nós estão dentro da faixa de tensão adequada para a curva de carga residencial, enquanto a Tabela 4 mostra que para 16 nós a tensão é considerada precária e os 262 nós restantes as tensões estão adequadas.

### 6.1.2. Circuito IEEE 123 barras com sistema fotovoltaico com inversor inteligente sem otimização

Nessa seção é realizada a simulação do circuito IEEE 123 barras com a inserção do sistema fotovoltaico com o controle do inversor inteligente sem otimização, a fim de analisar qual o impacto desse dispositivo na rede. A potência ativa dos sistemas fotovoltaicos instalados foi arbitrariamente definida em 400 kW, enquanto a potência aparente foi definida em 500 kW.

Para definir o local de instalação dos sistemas fotovoltaicos foram filtrados e selecionados apenas as barras trifásicas cuja tensão de base fosse maior ou igual a 1 kV, desconsiderando a barra da subestação da rede de distribuição. A partir das barras candidatas, o algoritmo selecionou de forma aleatória apenas 1 para a instalação. A barra escolhida pelo algoritmo foi a 49.

A Tabela 5 traz os resultados obtidos do fluxo de potência da rede de distribuição com 1 sistema fotovoltaico com inversor com fator de potência unitário para a curva de demanda horária com característica residencial.

Tabela 5 - Simulação com sistema fotovoltaico sem otimização e curva de demanda horária residencial

| <b>Tensão máxima (p.u)</b> | <b>Tensão mínima (p.u)</b> | <b>Perdas (kW)</b> | <b>Nós críticos</b> | <b>Nós precários</b> | <b>Nós adequados</b> | <b>Tempo (ms)</b> |
|----------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 1,0780                     | 0,9874                     | 90.357,3298        | 2                   | 0                    | 279                  | 210,88            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso da simulação do circuito com as mesmas configurações utilizando a curva de demanda horária com característica industrial, as informações foram compiladas na Tabela 6.

Tabela 6 - Simulação com sistema fotovoltaico sem otimização e curva de demanda horária industrial

| <b>Tensão máxima (p.u)</b> | <b>Tensão mínima (p.u)</b> | <b>Perdas (kW)</b> | <b>Nós críticos</b> | <b>Nós precários</b> | <b>Nós adequados</b> | <b>Tempo (ms)</b> |
|----------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 1,0615                     | 0,9108                     | 368.088,3490       | 1                   | 11                   | 269                  | 198,11            |

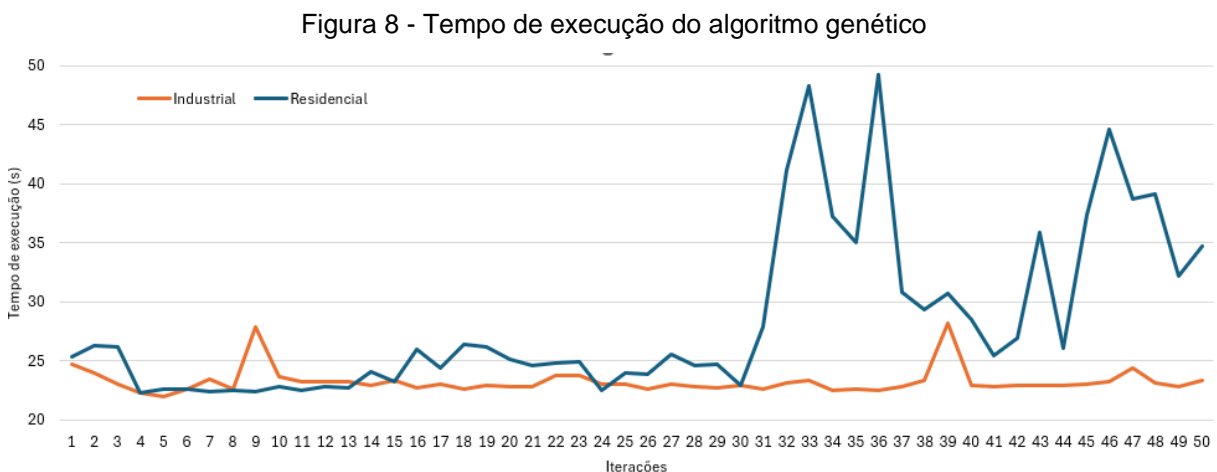
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao implementar os sistemas fotovoltaicos com inversor sem curva volt/Var otimizada, algumas barras experienciam uma sobretensão que excedem às recomendações do PRODIST para ambas as curvas de demanda horária. Contudo, é possível perceber que a presença da geração distribuída na rede de distribuição diminui as perdas totais do circuito. Para a curva de carga residencial a queda das perdas foi de 12,63%, enquanto para a industrial essa queda foi de 7,0%.

Segundo a Tabela 5, para a curva de carga com característica residencial, 2 nós ficaram com os níveis de tensão críticos, 0 ficaram precários e os 279 nós restantes estão na faixa de tensão adequada. Para a curva de carga com característica industrial, a Tabela 6 mostra que 1 nó ficou com a tensão na categoria crítica, enquanto 11 apresentaram tensão precária e 269 nós estão com as tensões adequadas.

### 6.1.3. Circuito IEEE 123 barras com sistema fotovoltaico com inversor inteligente e otimização

Nessa seção são compilados os dados da simulação do circuito IEEE 123 barras com a inserção do sistema fotovoltaico com o controle da curva Volt-VAr pelo inversor inteligente com o uso do algoritmo genético. As potências ativa e aparente instaladas dos sistemas fotovoltaicos foram mantidas as mesmas da simulação com o inversor sem otimização, bem como foi considerado o mesmo sistema fotovoltaico instalado na barra 49. O tempo de execução do algoritmo genético para cada iteração e por cada curva de carga, residencial e industrial, está mostrado na figura 8



Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 7 traz os 10 melhores resultados obtidos nessa simulação para a curva de carga residencial. A Tabela 8 traz os 10 melhores resultados obtidos nessa simulação para a curva de carga industrial.

Tabela 7 - Simulação com sistema fotovoltaico com otimização e curva de demanda horária residencial

| V1      | V2      | V3      | V4      | Tensão<br>máxima<br>(p.u) | Tensão<br>mínima<br>(p.u) | Perdas<br>(kW)     | Fitness           |
|---------|---------|---------|---------|---------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| 0,15373 | 0,19968 | 1,00157 | 1,47230 | 1,04373717                | 0,93000239                | 105.768,775        | 4,61484105        |
| 0,13295 | 0,22251 | 1,00003 | 1,63164 | 1,04373717                | 0,93001804                | 105.767,153        | 4,61480903        |
| 0,22959 | 0,29107 | 0,99519 | 1,80307 | 1,04373717                | 0,93002085                | 111.693,681        | 4,61480355        |
| 0,0046  | 0,15604 | 1,0047  | 1,36345 | 1,04373717                | 0,93002414                | 108.313,290        | 4,61473128        |
| 0,00868 | 0,47135 | 0,98239 | 1,56930 | 1,04373717                | 0,93003203                | 106.365,681        | 4,61462145        |
| 0,15706 | 0,21232 | 1,00083 | 1,63294 | 1,04373717                | 0,93003299                | <b>103.580,029</b> | 4,61460223        |
| 0,14764 | 0,2077  | 1,00117 | 1,35709 | 1,04373717                | 0,93003541                | 105.785,008        | 4,61456176        |
| 0,23418 | 0,42835 | 0,98548 | 1,26416 | 1,04373718                | 0,93003796                | 110.913,501        | 4,61445692        |
| 0,01079 | 0,22973 | 0,99963 | 1,18049 | 1,04373718                | 0,93004023                | 105.795,441        | 4,61445346        |
| 0,05745 | 0,29871 | 0,99479 | 1,72503 | 1,04373718                | 0,93005192                | 104.398,225        | <b>4,61440447</b> |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Simulação com sistema fotovoltaico com otimização e curva de demanda horária industrial

| V1      | V2      | V3      | V4      | Tensão<br>máxima<br>(p.u) | Tensão<br>mínima<br>(p.u) | Perdas<br>(kW)     | Fitness        |
|---------|---------|---------|---------|---------------------------|---------------------------|--------------------|----------------|
| 0,3560  | 0,88900 | 1,7046  | 1,98572 | 1,04998406                | 0,91037123                | 367.003,241        | 0,3560         |
| 0,37047 | 0,88864 | 1,70396 | 1,95921 | 1,04992972                | 0,91036849                | 367.011,259        | 0,37047        |
| 0,23935 | 0,89506 | 1,66908 | 1,82226 | 1,04991605                | 0,91036780                | 366.868,949        | 0,23935        |
| 0,38544 | 0,8882  | 1,70328 | 1,92003 | 1,04987533                | 0,91036574                | <b>366.820,317</b> | 0,38544        |
| 0,23079 | 0,89470 | 1,66842 | 1,93734 | 1,04985926                | 0,91036493                | 367.451,986        | <b>0,23079</b> |
| 0,32377 | 0,87751 | 1,75131 | 1,97767 | 1,04969001                | 0,91035639                | 367.175,732        | 0,32377        |
| 0,24413 | 0,87716 | 1,75061 | 1,8105  | 1,04963885                | 0,91035381                | 366.858,008        | 0,24413        |
| 0,25400 | 0,87681 | 1,74991 | 1,95843 | 1,04958764                | 0,91035122                | 367.362,905        | 0,25400        |
| 0,25389 | 0,87646 | 1,74921 | 1,859   | 1,04953652                | 0,91034864                | 367.612,085        | 0,25389        |
| 0,25379 | 0,87611 | 1,74851 | 1,920   | 1,04948536                | 0,91034606                | 367.619,989        | 0,25379        |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelas Tabelas 7 e 8 é possível perceber que ao aplicar o controle da função inteligente Volt-VAr com otimização, os valores de tensão máxima do circuito ficam

dentro dos requisitos estabelecidos pelo PRODIST de 1,05 p.u. Os valores de tensão mínima para a curva de carga residencial também se encontram dentro dos níveis considerados adequados. Contudo, na simulação aplicando a curva de demanda horária com característica industrial os valores da tensão mínima estão na faixa considerada precária, segundo os parâmetros do PRODIST. Mesmo para esse último caso houve uma pequena melhora, pois 1 das barras deixou de estar com nível de tensão crítico, conforme Tabela 6.

Nas simulações da rede distribuição utilizando o inversor inteligente com o emprego do algoritmo genético para a curva de carga residencial houve um aumento das perdas no circuito se comparado com a simulação com o controle do inversor inteligente sem otimização, já para a curva industrial houve uma ligeira melhora nas perdas observadas no circuito. Isso ocorre devido ao algoritmo genético definir a posição do sistema fotovoltaico de maneira aleatória e avaliar somente o controle da tensão do circuito sem considerar as perdas no cálculo da *fitness*.

As tabelas 9 e 10 trazem alguns dados estatísticos como a média e a moda das tensões registradas retirados das simulações para ambas as curvas de cargas.

Tabela 9 - Média e moda das tensões da simulação com sistema fotovoltaico com otimização e curva de demanda horária com característica industrial

| V1      | V2      | V3      | V4      | Média das tensões (p.u) | Moda das tensões (p.u)                       | Fitness  |
|---------|---------|---------|---------|-------------------------|--|----------|
| 0,3560  | 0,88900 | 1,7046  | 1,98572 | 0,976529536             | 0,914664<br>0,975209<br>1,009994<br>0,942040 | 99,18992 |
| 0,37047 | 0,88864 | 1,70396 | 1,95921 | 0,976524813             | 0,975199<br>1,009984<br>0,914711             | 99,18634 |
| 0,23935 | 0,89506 | 1,66908 | 1,82226 | 0,976609435             | 0,975383<br>1,010158<br>0,942267             | 99,18544 |
| 0,38544 | 0,8882  | 1,70328 | 1,92003 | 0,976638758             | 0,975446<br>1,010218<br>0,941866             | 99,18277 |
| 0,23079 | 0,89470 | 1,66842 | 1,93734 | 0,976272726             | 0,974652<br>1,009465<br>0,914605             | 99,18171 |
| 0,32377 | 0,87751 | 1,75131 | 1,97767 | 0,976429047             | 0,974991<br>1,009787<br>0,954096             | 99,17058 |
| 0,24413 | 0,87716 | 1,75061 | 1,8105  | 0,976616033             | 0,975397<br>1,010172<br>0,914543             | 99,16722 |
| 0,25400 | 0,87681 | 1,74991 | 1,95843 | 0,97632256              | 0,974760<br>1,009568<br>0,941813             | 99,16385 |
| 0,25389 | 0,87646 | 1,74921 | 1,859   | 0,976184547             | 0,974460<br>1,009284<br>0,914460             | 99,16049 |
| 0,25379 | 0,87611 | 1,74851 | 1,920   | 0,976180236             | 0,974451<br>1,009275                         | 99,15713 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Média e moda das tensões da simulação com sistema fotovoltaico com otimização e curva de demanda horária com característica residencial

| V1      | V2      | V3      | V4      | Média das tensões (p.u) | Moda das tensões (p.u) | Fitness     |
|---------|---------|---------|---------|-------------------------|------------------------|-------------|
|         |         |         |         |                         | 0,981561               |             |
| 0,15373 | 0,19968 | 1,00157 | 1,47230 | 1,014964123             | 0,997712               | 1754,763758 |
|         |         |         |         |                         | 1,017145               |             |
|         |         |         |         |                         | 0,981562               |             |
| 0,13295 | 0,22251 | 1,00003 | 1,63164 | 1,014964562             | 0,997713               | 1754,739009 |
|         |         |         |         |                         | 1,017146               |             |
|         |         |         |         |                         | 0,978211               |             |
| 0,22959 | 0,29107 | 0,99519 | 1,80307 | 1,013506315             | 0,999400               | 1754,734673 |
|         |         |         |         |                         | 1,021164               |             |
|         |         |         |         |                         | 0,980055               |             |
| 0,0046  | 0,15604 | 1,0047  | 1,36345 | 1,0143032               | 0,999965               | 1754,72922  |
|         |         |         |         |                         | 1,015930               |             |
|         |         |         |         |                         | 0,981199               |             |
| 0,00868 | 0,47135 | 0,98239 | 1,56930 | 1,014804229             | 0,997379               | 1754,717047 |
|         |         |         |         |                         | 1,016851               |             |
|         |         |         |         |                         | 0,983013               |             |
| 0,15706 | 0,21232 | 1,00083 | 1,63294 | 1,015650329             | 0,999161               | 1754,715307 |
|         |         |         |         |                         | 1,018440               |             |
|         |         |         |         |                         | 0,981551               |             |
| 0,14764 | 0,2077  | 1,00117 | 1,35709 | 1,014959735             | 0,997703               | 1754,711475 |
|         |         |         |         |                         | 1,022009               |             |
|         |         |         |         |                         | 0,978621               |             |
| 0,23418 | 0,42835 | 0,98548 | 1,26416 | 1,01368216              | 0,995044               | 1754,707844 |
|         |         |         |         |                         | 1,014795               |             |
|         |         |         |         |                         | 0,981545               |             |
| 0,01079 | 0,22973 | 0,99963 | 1,18049 | 1,014956915             | 0,997697               | 1754,703877 |
|         |         |         |         |                         | 1,022007               |             |
|         |         |         |         |                         | 0,982456               |             |
| 0,05745 | 0,29871 | 0,99479 | 1,72503 | 1,015386176             | 0,998603               | 1754,685482 |
|         |         |         |         |                         | 1,017941               |             |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das informações das tabelas 9 e 10 é possível perceber que a média da tensão no circuito para ambas as curvas de carga residencial e industrial estão dentro da faixa de tensão adequada do PRODIST. Analisando a coluna da moda entre

os valores das tensões dos barramentos para ambas as curvas também podem ser classificados em sua maioria como dentro da faixa de tensão adequada, com exceção de alguns poucos casos em que a condição de tensão na barra é classificada como precária, segundo o PRODIST.

## 7. CONCLUSÕES

A busca em suprir as novas demandas energéticas das redes de transmissão e distribuição com fontes de energia renováveis como a eólica e solar tem produzido uma corrida pela ampliação da geração distribuída nos circuitos elétricos. Os recursos energéticos distribuídos podem ser empregados para suprir o afundamento da tensão no decorrer do circuito e ajudar a aliviar a demanda da subestação ao contar com uma fonte geradora próxima dos centros consumidores. Contudo, o emprego em demasia desse tipo de tecnologia sem uma análise e cálculo dos impactos para a rede como um todo tem gerado outros problemas relacionados a qualidade da energia elétrica e segurança das redes de distribuição como a sobretensão e o fluxo reverso de potência, conforme visto nas tabelas 5 e 6. Ao se comparar com os resultados obtidos nas tabelas 3 e 4, houve um aumento das tensões máximas nos barramentos do circuito passando de 1,0437, em ambas as curvas residencial e industrial, para 1,0780 e 1,0615, respectivamente, fazendo com que atingissem níveis críticos e precários segundo os parâmetros do PRODIST.

O emprego das funções inteligentes dos inversores acoplados juntos aos sistemas fotovoltaicos tem se mostrado uma boa ferramenta no controle da potência total gerada e no consumo de potência reativa da rede por esses dispositivos, a fim de controlar os níveis de tensão e evitar sobretensões nos barramentos do circuito. Nas Tabelas 7 e 8 são mostrados como um algoritmo genético pode otimizar os pontos da curva de controle da função inteligente Volt-VAr a fim de controlar os níveis de tensão do circuito como um todo, mesmo quando a alocação dos sistemas fotovoltaicos é feita de maneira aleatória e não ideal. Para as curvas residencial e industrial, a tensão máxima registrada foi, respectivamente, 1,0437 e 1,0499 ante os 1,0780 e 1,0615 do cenário em que não há otimização da curva de controle.

Mesmo para diferentes configurações de curvas horária de demanda, o algoritmo genético e a função inteligente Volt-VAr do inversor foram capazes de manter os valores de tensão da maioria dos barramentos da rede 123 barras do IEEE em níveis adequados segundo os parâmetros estabelecidos pelo PRODIST, conforme analisado nas tabelas 9 e 10.

## REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2014. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em 15/07/2023.

COELLO, Carlos A.; LAMONT, Gary B.; VAN VELDHUIZEN, David A. **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**. 2. ed. Nova Iorque, Estados Unidos: Springer, 2007. 810 p.

CHIPPERFIELD, Andrew; FLEMING, Peter. **EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR CONTROL ENGINEERING**. Department of Automatic Control and Systems Engineering University of Sheffield, 1996.

EPE. **Matriz energética e elétrica**. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 15/11/2023.

EPRI. **Voltage regulation support from smart inverters**, 2017.

EPRI. **OpenDSS PVSystem and InvControl Element Models**, 2020.

FREITAS, Paulo Ricardo Radatz de. **Impactos de funções inteligentes de inversores de sistemas fotovoltaicos na operação de redes de distribuição de energia elétrica**. *Distribuição Elétrica*, São Paulo, Brasil, p. 191, 12 fev. 2020.

GUSH, Teke; KIM, Chul-Hwan; ADMASIE, Samuel; KIM, Ji-Soo; SONG, Jin-Sol. **Optimal Smart Inverter Control for PV and BESS to Improve PV Hosting Capacity of Distribution Networks Using Slime Mould Algorithm.**, *Coréia do Sul*, v. 9, p. 52164-52176, 31 mar. 2021.

IEEE. **IEEE 123 Node Test Feeder**. Distribution System Analysis Subcommittee, 2014.

IEEE. **IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces**, 2018.

MICHALEWICS, Z. **Genect Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3. ed.: Springer, 1996.

PRODIST. Anexo VIII Da Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro 2021. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST. **Módulo 8 – Qualidade do fornecimento de energia elétrica**, 2021. Disponível em: <[https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_2\\_7.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf)>. Acesso em 15/11/2023.

RYLANDER, Matthew; RENO, Matthew J.; QUIROZ, Jimmy E.; DING, Fei; LI, Huijuan; BRODERICK, Robert J.; MATHER, Barry; SMITH, Jeff. **Methods to Determine Recommended Feeder Wide Advanced Inverter Settings for Improving Distribution System Performance**. Estados Unidos, p. 1-6, 2016.

SEGUIN, Rich; WOYAK, Jeremy; COSTYK, David; HAMBRICK, Josh; MATHER, Barry. **High-Penetration PV Integration Handbook for Distribution Engineers**. National Renewable Energy Laboratory, p. 1-109, janeiro 2016.

SUNDERMAN, Wes; DUGAN, Roger C.; SMITH, Jeff. **Open-Source Modeling of Advanced Inverter Functions for Solar Photovoltaic Installations**. Electric Power Research Institute, Knoxville, USA, p. 1-5, 2014.

TONKOSKI, Reinaldo; LOPES, Luiz A. C.; EL-FOULY, Tarek H. M. Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention. **IEEE Transactions On Sustainable Energy**, v. 2, p. 139-147, abril 2011.

T. BÄCK, **“Evolutionary Algorithms in Theory and Practice”**, *Oxford University Press*, New York, 1996.

WALLING, R. A.; SAINT, Robert; DUGAN, Roger C.; BURKE, Jim; KOJOVIC, Ljubomir A. **Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems**.

**Working Group on Distributed Generation Integration**, v. 23, p. 1636-1644, julho 2008.

## APÊNDICE A – Algoritmo Genético em Python

```

1 import py_dss_interface
2 import random
3 import pandas as pd
4 import numpy as np
5 import math
6 from Methods import SmartInverterFunction
7
8
9 dss = py_dss_interface.DSS()
10 dss.text("Clear")
    dss_file =
11 r"C:\Users\Geovane\Desktop\TCC\OPENDSS\123bus\Run_IEEE123_Second_Script.dss"
12 dss.text(f"Compile [{dss_file}]")
13
14 dss.text("solve")
15
16
17 def set_baseline():
18     dss.text("New Energymeter.Feeder Line.L115 1")
19     dss.text("Set Maxiterations=100")
20     dss.text("set MaxControllter=100")
21     dss.text("Batchedit Load.* daily=Industrial")
22
23 def set_time_series_simulation():
24     dss.text("set controlmode=Static")
25     dss.text("set mode=daily")
26     dss.text("set number=1")
27     dss.text("set stepsize=1h")
28     dss.text("set hour=10")
    dss.text("New Loadshape.Industrial npts=24 interval=1 mult=(0.18000001 0.19000000
0.23999999 0.33000001 0.38999999 0.41000000 0.64999998 1.23000002 1.88999999
1.88999999 1.96000004 1.98000002 1.45000005 1.62000000 1.88999999 1.79999995
1.78999996 1.19000006 0.80000001 0.66000003 0.51999998 0.40000001 0.28000000
29 0.23000000)")
    dss.text("New Loadshape.Residencial npts=24 interval=1 mult=(0.69000000 0.50999999
0.44999999 0.41999999 0.55000001 0.85000002 1.01999998 0.80000001 0.89999998
0.91000003 1.02999997 1.03999996 1.11000001 0.98000002 0.94000000 0.94000000
1.02999997 1.26999998 1.51999998 1.59000003 1.75999999 1.50999999 1.29999995
30 0.89999998)")
31
32 def get_energymeter_results():
33     dss.meters.name="Feeder"
34     feeder_kwh = dss.meters.register_values[0]
35     feeder_kvarh = dss.meters.register_values[1]

```

```

36 loads_kwh = dss.meters.register_values[4]
37 losses_kwh = dss.meters.register_values[12]
38 pv_kwh = loads_kwh + losses_kwh - feeder_kwh
39
40 return feeder_kwh, feeder_kvarh, loads_kwh, losses_kwh, pv_kwh
41
42 def get_powerflow_results():
43     total_p_feederhead = -1 * dss.circuit.total_power[0]
44     total_q_feederhead = -1 * dss.circuit.total_power[1]
45     voltages = dss.circuit.buses_vmag_pu
46     voltage_min = min(voltages)
47     voltage_max = max(voltages)
48
49     return total_p_feederhead, total_q_feederhead, voltage_min, voltage_max
50
51
52 #CRIANDO A FUNÇÃO DE MÉTRICA
53 def foo(voltages):
54     aux = 0
55     cont_FORA = 0
56     cont_PERMITIDO = 0
57     cont_DENTRO = 0
58     for v in voltages:
59         if v == 0:
60             aux += 9999999
61         elif v < 0.90 or v > 1.05:
62             aux += abs(1 - v)*200
63             cont_FORA += 1
64         elif 0.90 <= v < 0.93:
65             aux += abs(1 - v)*100
66             cont_PERMITIDO += 1
67         elif 0.93 <= v <= 1.05:
68             aux += abs(1 - v)
69             cont_DENTRO += 1
70     return aux, cont_FORA, cont_PERMITIDO, cont_DENTRO
71
72
73 #CRIANDO A POPULAÇÃO INICIAL
74 def gerar_solucão():
75     return round(random.uniform(0, 2), 6)
76
77
78 #CRIANDO A FUNÇÃO OBJETIVO
79 def fitness(voltages):
80
81     ans = 0

```

```
82  ans = foo(voltages)[0]
83
84  FORA = foo(voltages)[1]
85  PERMITIDO = foo(voltages)[2]
86  DENTRO = foo(voltages)[3]
87
88
89  final = abs(1/ans)
90  return final*10000, FORA, PERMITIDO, DENTRO
91
92
93  # Gerando as soluções (V1, V2, V3 e V4)
94  solutions = []
95
96  for s in range(100):
97      v4 = gerar_solucacao()
98
99      while True:
100         v3 = gerar_solucacao()
101         if v3 < v4:
102             break
103
104         while True:
105             v2 = gerar_solucacao()
106             if v2 < v3:
107                 break
108
109         while True:
110             v1 = gerar_solucacao()
111             if v1 < v2:
112                 break
113
114         solutions.append((v1, v2, v3, v4))
115
116
117
118  #Aplicar a escolha aleatória das barras
119  buses = dss.circuit.buses_names
120  mv_buses = list()
121  mv_bus_voltage_dict = dict()
122  for bus in buses:
123      dss.circuit.set_active_bus(bus)
124      if bus == "150" or bus == "150r":
125          pass
126      elif dss.bus.kv_base >= 1.0 and len(dss.bus.nodes) == 3:
127          mv_buses.append(bus)
```

```

128     mv_bus_voltage_dict[bus] = dss.bus.kv_base*math.sqrt(3)
129
130 random.seed(20)
131 selected_buses = random.sample(mv_buses, 1)
132 random.seed(None)
133
134
135
136 df = pd.DataFrame()
137 for i in range(50):
138     # Aplicando as soluções na função de controle Volt-VAr do OpenDSS
139     rankedolutions = []
140     power_p_feedheade_list = list()
141     power_q_feedheade_list = list()
142     power_losses_list = list()
143
144
145     for s in solutions:
146
147         voltages = 0
148         dss.text("Clear")
149         dss.text(f"Compile [{dss_file}]")
150
151         set_time_series_simulation()
152         set_baseline()
153
154
155         for bus in selected_buses:
156             SmartInverterFunction(dss, bus, mv_bus_voltage_dict[bus], 400, 500)
157             myXValues = dss.xycurves.x_array
158             dss.xycurves._name_write("volt-var")
159             dss.xycurves._x_array_write( (float(s[0]), float(s[1]), float(s[2]), float(s[3])) )
160             myXValues = dss.xycurves.x_array
161
162
163         dss.dssinterface.allow_forms = False
164         dss.text("makebuslist")
165         dss.text("Interpolate")
166         dss.text("solve")
167         PV_q = dss.pvsystems.kvar
168
169
170         # Teste de iterações
171         solution_most_iterations_done = 0
172         solution_most_iterations_done = dss.solution.most_iterations_done
173         solution_read_control_iterations = 0

```

```

174     solution_read_control_iterations = dss.solution.control_iterations
175
176     if solution_read_control_iterations == 100 or solution_most_iterations_done == 100:
177         voltage_max = 0
178         voltage_min = 0
179         power_losses = 0
180         voltages = [0]
181         cktloess = 0
182     else:
183         voltages = dss.circuit.buses_vmag_pu
184         voltage_max = max(voltages)
185         voltage_min = min(voltages)
186         energymeter_data = get_energymeter_results()
187         cktloess = dss.circuit.losses[0]
188
189     fitness_data = get_powerflow_results()
190     power_p_feedheade_list.append(fitness_data[0])
191     power_q_feedheade_list.append(fitness_data[1])
192
193     media = np.mean(voltages)
194     numeros_series = pd.Series(voltages)
195     moda = numeros_series.mode()
196
197     rankedolutions.append( (fitness(voltages)[0],s, (voltage_max, voltage_min),
198 (fitness(voltages)[1],fitness(voltages)[2],fitness(voltages)[3])) )
199 #voltage_max, voltage_min
200     rankedolutions.sort(reverse=True)
201     print(f"=== Gen {i} best solutions === ")
202     print(rankedolutions[0])
203     print(f"Perdas kW = {cktloess}, Média = {media}, Moda = {moda.values}")
204
205
206     data = {
207         'Geração': [i], # Coloque o valor em uma lista
208         'Fitness': [rankedolutions[0][0]], # Coloque o valor em uma lista
209         'Solução': [rankedolutions[0][1]], # Coloque o valor em uma lista
210         'Tensao_max': [rankedolutions[0][2][0]], # Coloque o valor em uma lista
211         'Tensao_min': [rankedolutions[0][2][1]], # Coloque o valor em uma lista
212         'Perdas' : [cktloess],
213         'Media' : [media],
214         'Moda' : [moda]
215     }
216
217     iter_df = pd.DataFrame(data)
218

```

```
219 df = pd.concat([df, iter_df], ignore_index=True)
220
221
222 #Selecionando as 100 melhores das 1000 soluções avaliadas
223 bestsolutions = rankedsolutions[:100]
224
225 elements_1 = []
226 elements_2 = []
227 elements_3 = []
228 elements_4 = []
229
230 for s in bestsolutions:
231     elements_1.append(s[1][0])
232     elements_2.append(s[1][1])
233     elements_3.append(s[1][2])
234     elements_4.append(s[1][3])
235
236 # Gerando a próxima geração de cromossomos
237 newGen = []
238 for _ in range(500):
239
240     while True:
241         e4 = round(min(random.choice(elements_4) * random.choice([0.98, 1.02]), 2), 6)
242         e3 = round(min(random.choice(elements_3) * random.choice([0.98, 1.02]), 2), 6)
243         e2 = round(min(random.choice(elements_2) * random.choice([0.98, 1.02]), 2), 6)
244         e1 = round(min(random.choice(elements_1) * random.choice([0.98, 1.02]), 2), 6)
245
246         if e1 < e2 < e3 < e4:
247             break
248
249     newGen.append((e1,e2,e3,e4))
250
251 solutions = newGen
252
253 df.to_excel('rankedsolutions.xlsx', index=False)
```

## APÊNDICE B – Função suporte para implementar o sistema fotovoltaico

```

1 class SmartInverterFunction:
2
3     def __init__(self, dss, bus, kV_base, kW_rated, kVA):
4
5         self.dss = dss
6         self.bus = bus
7         self.kV_base = kV_base
8         self.kW_rated = kW_rated
9         self.kVA = kVA
10
11     self.__define_3ph_pvsystem_with_transformer()
12
13     def __define_3ph_pvsystem_with_transformer(self):
14         self.__define_transformer()
15
16         self.dss.text("makebuslist")
17         self.dss.text(f"setkVBase bus=PV_{self.bus} kVLL=0.48")
18
19         self.__define_pvsystem_curves()
20
21         self.__define_pvsystem()
22
23     def __define_transformer(self):
24         self.dss.text(
25             f"New transformer.PV_{self.bus} "
26             f"phases=3 "
27             f"windings=2 "
28             f"buses={({self.bus}, PV_{self.bus}) "
29             f"conns=(wye, wye) "
30             f"kVs={({self.kV_base}, 0.48) "
31             f"xhl=5.67 "
32             f"%R=0.4726 "
33             f"kVAs={({self.kVA}, {self.kVA})")
34
35
36     def __define_pvsystem_curves(self):
37         self.dss.text("New XYCurve.MyPvsT "
38             "npts=4 "
39             "xarray=[0 25 75 100] "
40             "yarray=[1.2 1.0 0.8 0.6]")
41
42         self.dss.text("New XYCurve.MyEff "
43             "npts=4 "

```

```

44         "xarray=[.1 .2 .4 1.0] "
45         "yarray=[0.86 0.90 0.93 0.97]")
46
47     self.dss.text(
48         "New Loadshape.MyIrrad "
49         "npts=24 "
50         "interval=1 "
51         "mult=[0 0 0 0 0 .1 .2 .3 .5 .8 .9 1.0 1.0 .99 .9 .7 .4 .10 0 0 0 0]")
52
53     self.dss.text(
54         "New Tshape.MyTemp "
55         "npts=24 "
56         "interval=1 "
57         "temp=[25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 25, 35, 40, 45, 50 60 60 55 40 35 30 25 25 25 25
58         25 25]")
59     def __define_pvsystem(self):
60         self.dss.text(
61             f"New PVSystem.PV_{self.bus} "
62             f"phases=3 "
63             f"conn=wye "
64             f"bus1= PV_{self.bus} "
65             f"kV=0.48 "
66             f"kVA={self.kVA} "
67             f"Pmpp={self.kW_rated} "
68             f"%cutin=0.1 "
69             f"%cutout=0.1 "
70             f"VarFollowInverter=true "
71             f"effcurve=Myeff "
72             f"P-TCurve=MyPvsT "
73             f"Daily=MyIrrad "
74             f"TDaily=MyTemp "
75             f"wattpriority=False"
76         )
77
78         x_vv_curve = "[0.9 1 1.5 2]"
79         y_vv_curve = "[1 1 -1 -1]"
80         self.dss.text(f"new XYcurve.volt-var npts=4 yarray={y_vv_curve} xarray={x_vv_curve}")
81         self.dss.text(
82             f"new invcontrol.inv_{self.bus} "
83             f"mode=voltvar "
84             f"voltage_curve_x_ref=rated "
85             f"vc_curve1=volt-var "
86             f"RefReactivePower=VARMAX"
87         )

```