

ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM DISTORÇÕES HARMÔNICAS ATRAVÉS DO FATOR DE POTÊNCIA USANDO A LÓGICA NEBULOSA IMPLEMENTADA EM PYTHON

Jacinto Costa Damião
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: [0009-0007-7832-7379](https://orcid.org/0009-0007-7832-7379)

Sílvia Sousa Resende
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: [0009-0006-9229-5513](https://orcid.org/0009-0006-9229-5513)

Poliana Caldeira dos Santos
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: [0009-0005-1420-0454](https://orcid.org/0009-0005-1420-0454)

Thales Lima Oliveira
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brazil
ORCID: [0000-0001-7189-5110](https://orcid.org/0000-0001-7189-5110)

Resumo – Este trabalho apresenta uma análise da qualidade de energia elétrica em sistemas de geração distribuída (GD), com foco nos impactos causados por distorções harmônicas. A metodologia proposta utiliza a lógica nebulosa, implementada em Python, para avaliar o fator de potência (FP) de maneira mais abrangente e precisa, considerando as condições dinâmicas do sistema. A lógica nebulosa é aplicada para classificar e interpretar dados de distorções harmônicas, fornecendo uma visão detalhada sobre o comportamento do FP em cenários complexos. A análise considera diferentes configurações de sistemas de GD e níveis de distorção harmônica, demonstrando a eficácia da abordagem na identificação de padrões críticos e no suporte à tomada de decisões para melhorar a qualidade da energia. Os resultados obtidos mostram que a implementação proposta pode contribuir significativamente para a otimização do desempenho dos sistemas de GD, reduzindo os efeitos adversos das distorções harmônicas e promovendo maior eficiência energética.

Palavras-chave: Geração distribuída, lógica nebulosa, qualidade de energia, fluxo de potência e Distorção.

ANALYSIS OF POWER QUALITY IN A DISTRIBUTED GENERATION SYSTEM WITH HARMONIC DISTORTIONS THROUGH THE POWER FACTOR USING THE FUZZY LOGIC IMPLEMENTED IN PYTHON

Abstract – This work presents an analysis of the quality of electric power in distributed generation (DG) systems, focusing on the impacts caused by harmonic distortions. The proposed methodology uses fuzzy logic, implemented in Python, to evaluate the power factor (FP) in a more comprehensive and accurate way, considering the dynamic conditions of the system. Fuzzy logic is applied to classify and interpret harmonic distortion data, providing detailed insight into FP behavior in complex scenarios. The analysis considers different DG system configurations and harmonic distortion levels, demonstrating the effectiveness of the approach in identifying critical patterns and supporting decision-making to improve power quality. The results obtained show that the proposed implementation can contribute significantly to the optimization of the performance of DG systems, reducing the adverse effects of harmonic distortions and promoting greater energy efficiency.

Keywords: Distributed generation, fuzzy logic, power quality, power flow and Distortion.

I. INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica em todo o mundo é crescente e acelerada. Esse crescimento é provocado principalmente pelo aumento populacional e pela dependência de tecnologias que necessitam de energia elétrica. Essa dependência gera uma necessidade cada vez maior por energia disponível, sobretudo com o intuito de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e a preferência por fontes de energia que não poluem, levando à busca de novas fontes de energia para a geração de eletricidade [8].

Além da busca de novas fontes de energia, que também permitam diversificar a matriz energética brasileira, há a preocupação com os indicadores da qualidade da energia elétrica. Isso se deve, especialmente, ao fato de que a inserção de sistemas de energias renováveis, como sistema de geração fotovoltaica (SGFV) e geração eólica, além de sistemas de iluminação através de lâmpadas com tecnologia de diodos emissores de luz (LED), dentre outras cargas, utilizam muitos componentes não lineares que, por sua vez, provocam a elevação dos níveis de distorções harmônicas no sistema elétrico [4].

Entretanto na atualidade, os sistemas de energia elétrica são projetados para atender a demanda de energia de forma contínua, respeitando padrões de qualidade (limites de tensão e frequência) e segurança, assim como restrições econômicas e ambientais [2].

Refira-se que para planejar e operar um sistema de energia elétrica de maneira econômica e segura é de fundamental importância definir-se um modelo adequado para cada elemento do sistema. A medição confiável de parâmetros elétricos é fundamental para a operação de qualquer sistema elétrico.

Desta forma, quando se aborda a produção e utilização de energia elétrica, as aplicações neste ramo têm ganho importância atualmente com a expansão de sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento em bancos de baterias. As tecnologias atuais são capazes de realizar tal tarefa, porém ainda há espaço para o desenvolvimento de normativas e meios mais econômicos e adequados para obtenção de indicadores da qualidade de energia elétrica em tais sistemas. A utilização de Sistemas de Geração Distribuída (SGD) no Brasil, principalmente de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) tende a aumentar, visto que existem muitos investimentos em pesquisas e tecnologia no setor e em alguns países, o governo utiliza programas para fomentar o uso de energias renováveis. Entretanto, esse aumento significativo de

SFCR pode trazer alguns novos desafios para as concessionárias, principalmente na questão da qualidade da energia entregue por esses sistemas e na interface com a rede [6].

A qualidade de energia elétrica é, então, avaliada pela magnitude das tensões nas barras de consumo e pela frequência estabelecida no sistema. Dois estados devem ser considerados durante a operação do sistema elétrico: o regime permanente e o regime transitório. Dentro deste contexto, torna-se necessário um profundo conhecimento da operação, dos ajustes e do desempenho de cada elemento do sistema, tanto isoladamente quanto em conjunto, pois as características de um elemento isolado podem ser alteradas diante da operação em conjunto [7].

O presente trabalho visou implementar uma metodologia que permitiu aprimorar o estudo de um sistema de geração distribuída com base em fonte solar fotovoltaica trifásico de baixa tensão com distorções harmônicas, através do fator de potência com a aplicação da lógica fuzzy implementada com base na linguagem *Phyton*, diminuindo assim consequências como perdas na instalação, quedas de tensão, subutilização da capacidade instalada, visando a otimização do uso da energia elétrica trazendo vantagens tanto para o consumidor final como para a empresa concessionária.

O artigo está organizado em seis seções, sendo sequencialmente a introdução, a fundamentação teórica explícita por conceitos teóricos e práticos que foram usados como base para o estudo em questão. A seguir foi apresentada a metodologia implementada no estudo e sequencialmente o desenvolvimento do estudo em si. O artigo encerra na sexta seção com a discussão de resultados, seguido pelas referências bibliográficas usadas.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Sistema Integrado Nacional (SIN) é um dos maiores sistemas elétricos do mundo e com características próprias, como as interligações de longas distâncias e bacias hidrográficas típicas de cada região. A atual estrutura do setor elétrico brasileiro impõe que a operação do sistema seja feita de forma a explorar os recursos existentes ao menor preço possível. Durante a operação de um sistema elétrico, um dos principais objetivos é manter a estabilidade do sistema. Refira-se que dentro de uma rede elétrica existem cargas não lineares, geradas por vários equipamentos tais como motores, geradores, transformadores, capacitores e equipamentos eletrônicos, os quais são responsáveis por distúrbios dentro da rede, tais distúrbios geram distorções harmônicas. Altos níveis de distorção harmônica na rede elétrica podem gerar problemas para a concessionária distribuidora de energia elétrica e para a própria unidade consumidora até mesmo em relação aos próprios equipamentos instalados.

Alguns conceitos básicos sobre o tema em questão são apresentados a seguir, conforme definição do IEEE 1993 [3], para um melhor entendimento do assunto.

2.1 Sistemas eletricos fotovoltaicos de geração distribuída

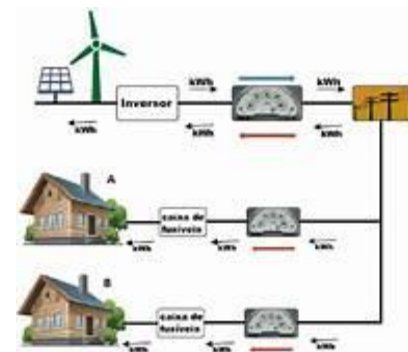
O conceito de Sistema de Geração Distribuída (SGD) é usualmente empregado em situações onde a geração de energia elétrica está localizada próximo ao ponto de consumo. Esses sistemas podem ser de grande porte como centrais fotovoltaicas ou de pequeno porte como em edificações urbanas e independem

da potência [7].

Os sistemas GD não utilizam armazenamento de energia elétrica em fontes como baterias, pois a rede elétrica de distribuição já possui a característica de acumuladora infinita, onde toda a energia produzida é entregue para a rede. Quando a unidade consumidora (UC) responsável pela geração, injeta na rede de distribuição energia elétrica excedente, significa que a geração é superior ao consumo.

A energia elétrica excedente é um empréstimo gratuito a distribuidora local, contabilizado em créditos de energia. Quando o contrário ocorre e a UC apresenta consumo de energia maior que a energia elétrica gerada, existe a compensação por meio da distribuidora suprimindo a diferença, onde os créditos serão utilizados, ou caso não haja créditos, o consumidor pagará a diferença. A Fig. 1 mostra um esquema do sistema de compensação de energia elétrica. [2]; [7].

Figura 1 - Sistema de compensação de energia elétrica.



Os SFCR são os mais utilizados na GD devido a simplicidade de instalação, a facilidade de expansão, o elevado grau de confiabilidade, mínima necessidade de manutenção, os baixos níveis sonoros de operação e as mínimas emissões de poluentes, se encaixando nas fontes de energia renovável que utiliza o sol como força motriz [7]. Os principais componentes dos SFCR são basicamente dois, o gerador fotovoltaico e o inversor c.c./c.a (corrente contínua/corrente alternada) sendo esse último de fundamental importância para os SFCR, pois além de fazer a transformação de c.c. em c.a., é ainda responsável por entregar uma energia de qualidade a rede de distribuição [5].

2.2 Qualidade de energia eletrica (QEE)

Qualidade é um conceito para o qual não é muito fácil apresentar uma definição clara e objectiva. Contudo, existe um consenso generalizado de que “a qualidade é a adequação de determinado bem ou serviço à sua finalidade ou uso”. No domínio elétrico, pode considerar-se que a energia fornecida por um sistema elétrico tem qualidade quando garante o funcionamento do equipamento elétrico, sem que se verifiquem alterações de desempenho significativas [2].

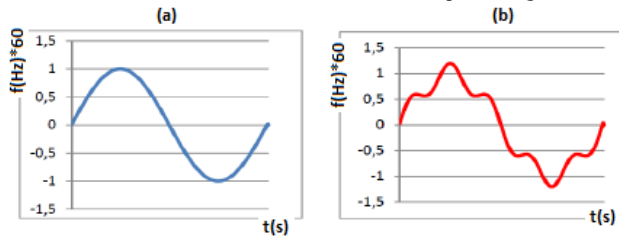
Numa perspectiva de distribuição de energia, QEE está geralmente associada à qualidade e a continuidade da onda de tensão. Em condições normais de exploração, a tensão fornecida ao cliente é controlada pelos sistemas de distribuição, sendo a corrente absorvida dependente da carga das instalações. Neste contexto, a QEE pode ser abordada a duas dimensões, a saber:

- continuidade de tensão, caracterizada pela frequência e duração das interrupções de fornecimento de energia eléctrica;
- qualidade da onda de tensão, caracterizada pela forma da onda de tensão, amplitude, frequência e simetria do sistema trifásico de tensões.

O sistema trifásico disponibilizado ao cliente é caracterizado

por três tensões sinusoidais, com amplitude e frequência (60 Hz no Brasil) constantes e desfasadas em 120°, no tempo. Desvios significativos a estas características de tensão conduzem inevitavelmente à degradação da QEE. A figura 2, ilustra este comportamento da onda.

Figura 2 - a) Onda senoidal pura proveniente de cargas lineares; b) Onda senoidal com conteúdo harmônico causado por cargas não-lineares



Refira-se que quando existem problemas com a qualidade da energia entregue ao sistema alguns distúrbios podem aparecer como interrupção no fornecimento de energia, níveis de tensão fora do padrão, oscilações de tensões e frequência, distorções harmônicas de corrente e tensão, ruídos, transitórios entre outros problemas de ordem elétrica [4].

A partir deste cenário, conhecer a qualidade da energia elétrica a ser injetada na rede passa a ser crucial e deve ser incorporada na fase de estudos durante o anteprojeto para garantir que todos os equipamentos irão operar de forma adequada e com o máximo desempenho (JUNIOR; RÜTHER, 2011).

2.3 Harmônicas

Distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (PRODIST). Estas são componentes sinusoidais de uma tensão ou corrente alternada com frequência igual ou múltipla inteira da frequência do sistema, no caso brasileiro, 60 Hz, sendo que a ordem da harmônica é contabilizada pelo número de vezes que a frequência da mesma é múltipla da fundamental [2].

O aparecimento das harmônicas é avaliado pelo THD (Distorção Harmônica Total), que surgiu devido a necessidade de quantificar as harmônicas presentes no sistema. O THD pode ser definido como o quociente entre o valor eficaz do conjunto das harmônicas e o valor eficaz da componente fundamental, entretanto, quando forem ondas sinusoidais puras, a THD é igual a zero [7].

Em SGD quando analisado o inversor, a soma de todas as componentes individuais de corrente (THDi) não devem ultrapassar 5 %, e quando analisada a qualidade da energia da rede que atende determinada unidade prosumidora, a THDv deve ser no máximo de 5 %, fornecendo um parâmetro adequado para garantir a eficiência do inversor [7].

Além disso, a ABNT NBR 16150 de 2013 que especifica os procedimentos de ensaio dos equipamentos utilizados em SFCR, aponta que, para avaliar exclusivamente o comportamento da THDi produzida pelo inversor, a THDv da rede de distribuição deve ser menor que 2,5 % garantindo que haja mínima ou nenhuma influência da THDv sobre a THDi.

Os índices de distorção de tensão e de corrente em um sistema elétrico são calculados pelas expressões (1) e (2).

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} * 100\% \quad (1)$$

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} * 100\% \quad (2)$$

2.4 Fator de potência

Um elemento de grande importância para a qualidade de energia elétrica é o fator de potência, pois ele indica a eficiência do uso da energia, ou seja, um alto fator de potência indica uma eficiência alta e um fator de potência baixo indica baixa eficiência energética, no Brasil o padrão limite para o fator de potência é de no mínimo 0,92, logo um fator de potência menor que o limite estabelecido é taxado com multa pela concessionária. O fator de potência (fp) pode ser definido como a diferença de fase entre a onda de tensão e corrente, isso quer dizer que a potência ativa (P) é menor que a potência aparente (S) e a diferença entre elas é chamada de potência reativa (Q). Portanto, o fp pode ser calculado através da razão entre a potência ativa e a aparente [4], explícita na expressão (3). O termo $\cos \varphi$ é chamado de fator de potência do circuito, e o ângulo é às vezes conhecido como ângulo do fator de potência.

$$fp = \frac{Pact[kW]}{Preact[kVA]} \quad (3)$$

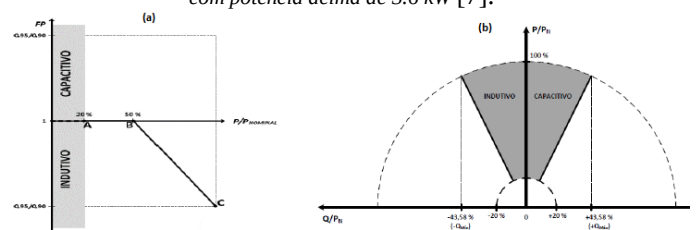
Se $fp = \cos \varphi$ então,

$$\varphi = \arctg \left[\frac{Preact[kVar]}{Pact[kW]} \right] \quad (4)$$

A ABNT NBR 16149 (2013), diz que quando for injetada potência ativa acima de 20% da capacidade nominal do inversor, esse deve ser capaz de ajustar o FP dentro de limites preestabelecidos, sendo que, em todos os casos o inversor deverá vir com FP igual a 1 direto de fábrica.

Quando a potência do SFCR for igual ou menor que 3 kW, a faixa de tolerância é entre 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo. Se o sistema fotovoltaico apresentar potência entre 3 kW e 6 kW, o inversor deve trabalhar na mesma faixa descrita anteriormente, porém, deve ser possível ajustá-lo, entre 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo, de acordo com a Fig. 3 (a), onde P representa a potência instantânea e Pnominal a potência nominal ou através do controle de potência reativa (Q) conforme Fig. 3 (b) [7].

Figura 3- a) Curva do fp em função da potência ativa de saída do inversor; b) Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência acima de 3.6 kW [7].



O baixo valor de fator de potencia (FP) reflete na redução de potência ativa, aumentando a circulação de potência reativa na rede, causando perdas através dos condutores, interferência nas cargas, diminuição da eficiência, entre outros (SILVA, 2008). Entretanto, a potência reativa não apresenta só malefícios, ela é, na verdade, muito importante para manter a rede equilibrada, ou seja, toda vez que um sistema fotovoltaico é conectado à rede elétrica de energia, ele provoca uma pequena elevação da tensão da mesma [8].

2.4.1 Normas relativas aos fatores de potência

No Brasil, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, órgão responsável de fiscalizar e regularizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica no país,

estabelece alguns aspectos os quais devem ser abordados relacionados ao fator de potência [4]:

- O limite mínimo do fator de potência é de 0.92;
- O faturamento da energia reativa excedente;
- O período de avaliação do fator de potência deve ser horário;
- O fator de potência deve de no mínimo de 0.92 capacitivo das 6h as 24h;
- O fator de potência deve ser no mínimo de 0.92 indutivo das 24h as 6h;

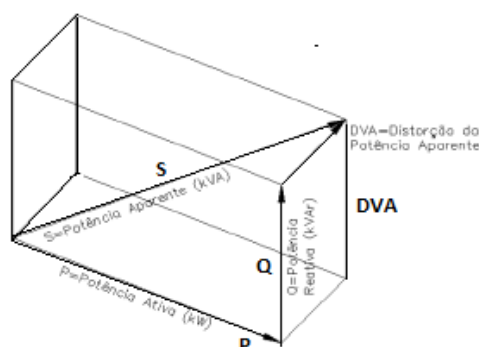
Dessa maneira as concessionárias faturam a quantidade de energia ativa que poderia ser transportado no espaço ocupado pelo consumo de energia reativa. O excedente reativo excedente é avaliado pela concessionária, que é calculado com base nos valores de energia ativa e de energia reativa medidos.

A ANEEL estabelece que o fator de potência de unidades consumidoras com sistema trifásico de baixa tensão deve ser verificado através de medição transitória, desde que por um período mínimo de 7 dias consecutivos.

2.4.2 Fator de potência e harmônicas

Com a existência de distorções harmônicas na rede elétrica a avaliação do sistema é feita com mais uma variável, a qual pode ser vista na figura 4, abaixo com uma terceira dimensão no triângulo de potências.

Figura 4 - Representação da relação entre as potências e a distorção harmônica [7].



Onde **P** - a potência ativa, **S** - a potência aparente e o **DVA**-distorção da potência aparente

O fator de distorção é a outra parcela que entra na fórmula do fator de potência, quando é levado em consideração tanto a diferença de fase entre tensão e corrente como a distorção harmônica existente é dito fator de potência real explícita em (5).

$$fp = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} \cos\phi. \quad (5)$$

2.2 Lógica Nebulosa

A lógica nebulosa, ou fuzzy, foi introduzida em 1965 por Loft Zadeh. É uma abordagem que lida com a incerteza e a imprecisão associadas a sistemas complexos. Em contraste com a lógica clássica, que opera com valores binários (verdadeiro/falso), a lógica nebulosa trabalha com conjuntos fuzzy, nos quais os valores podem variar de forma contínua entre 0 e 1. Essa flexibilidade é particularmente valiosa ao lidar com variáveis elétricas sujeitas a flutuações e perturbações.

Um dos principais componentes da lógica nebulosa é o sistema de controle fuzzy. A resolução de problemas em lógica nebulosa geralmente envolve os seguintes passos:

Primeiro - Fuzzyficação:

Converte entradas nítidas em valores fuzzy (pertinências) em conjuntos fuzzy. Isso é feito usando funções de pertinência que atribuem graus de pertinência a cada valor em relação a cada conjunto fuzzy.

Segundo - Aplicação de Regras Fuzzy:

Define um conjunto de regras lógicas que relacionam as entradas fuzzy com as saídas fuzzy desejadas. As regras são formuladas utilizando operadores fuzzy como "E" (e), "OU" (ou), etc.

Terceiro - Inferência Fuzzy:

Combina as regras fuzzy para produzir uma saída fuzzy agregada. Existem diferentes métodos de inferência, como a inferência de Mamdani ou a inferência de Takagi-Sugeno.

Quarto - Defuzzyficação:

Converte a saída fuzzy agregada em um valor nítido, que representa a resposta final do sistema. Isso é feito através de métodos como a média ponderada.

Quinto - Ajuste e Otimização:

Cada um desses passos pode envolver diferentes algoritmos específicos dependendo da aplicação e do contexto. Algoritmos de otimização, como algoritmos genéticos, redes neurais ou métodos baseados em lógica difusa, também podem ser utilizados para ajustar automaticamente os parâmetros do sistema fuzzy.

Além disso, bibliotecas de programação como SciKit-Fuzzy em Python fornecem implementações prontas para uso de muitos desses conceitos, permitindo que os desenvolvedores implementem sistemas de controle fuzzy sem precisar criar todos os algoritmos do zero. Na modelagem de sistemas elétricos de potência, a lógica nebulosa permite representar a incerteza associada a parâmetros como carga, resistência, tensão e reatância, proporcionando uma descrição mais realista da transição entre diferentes estados operacionais. Isso é especialmente útil ao considerar a variação da carga ao longo do tempo. **Benefícios:** a) **Lida com Incerteza:** A lógica nebulosa proporciona uma modelagem robusta ao incorporar a incerteza dos parâmetros do sistema. b) **Flexibilidade na Representação:** A capacidade de lidar com conjuntos fuzzy torna a representação mais flexível e adaptável, particularmente quando os valores exatos são difíceis de determinar. c) **Melhor Compreensão do Comportamento do Sistema:** Ao capturar nuances e relações difusas, a lógica nebulosa facilita uma compreensão mais profunda do comportamento dinâmico dos sistemas elétricos de potência.

2.3 Métodos de agregação dos indicadores

O PRODIST, em seu módulo 8, normatiza certos indicadores da qualidade de energia, tais como: fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão e frequência elétrica. A Tabela 1 resume os limites para tais índices, com referência a sistemas elétricos em tensão máxima de fornecimento de 1 kV, e que são adotados como valores de referência para análises desenvolvidas.

Tabela 1 – Valores de referência para os índices de qualidade de energia [2]

Índice	Mínimo	Máximo
Fator de Potência	0,92	1,0
Harmônico de tensão	-	10%
Desiquilíbrio de tensão	-	3%
Flutuação de tensão (pst95%)	-	1,0
Variação de frequência	59,9	60,1

De forma geral, a análise qualitativa de sistemas elétricos deve ser realizada sobre dados coletados in loco utilizando equipamentos adequados. Como medida complementar, a análise pode ser feita sobre as faturas de energia elétrica, porém destaca-se que esta é menos precisa. Sobre os dados auferidos foram realizadas as análises e por fim o estado da instalação é indicado. Caso fossem necessárias, medidas corretivas foram indicadas e/ou aplicadas.

III. METODOLOGIA

O artigo é reflexo da pesquisa exploratória, explicativa e essencialmente experimental adotada pelos autores. A metodologia dedutiva aplicada para o desenvolvimento deste trabalho assentou-se no primeiro método de agregação explícito pela determinação experimental das características das cargas (composta) típicas, pela medição de parâmetros elétricos usando o analisador - PowerNET P-600 G4.

O uso do algoritmo de otimização da lógica nebulosa visa obter bons resultados mesmo para níveis de tolerância muito baixos, fornecendo dados preciosos quando se trabalha com sistemas tão sensíveis como o SEP.

O script do algoritmo foi redigido utilizando a linguagem Python, utilizando o editor de código-fonte *Visual Code Studio*, sendo uma ferramenta mais leve e modular que uma *IDE (Integrated Development Environment)* padrão. As bibliotecas utilizadas foram: Numpy [9] (para composição das arrays, leitura destas e ferramentas matemáticas que envolvem equações não-lineares), scikit-fuzzy [9] (para leitura da planilha e composição dos dataframes e a respectiva fuzzyficação), Math e Cmath [9] (para execução de operações matemáticas e conversão de tipos de variáveis) e Matplotlib [9] (para plot das curvas).

Para tantas possibilidades, foi gerado um número significativo de curvas que agrupadas, estatisticamente é denominada população de curvas, cabendo a resposta da questão, pela análise desta população usando a lógica nebulosa ou fuzzy, implementada em Python.

IV. DESENVOLVIMENTO

O SFCR, objeto de estudo localiza-se em Uberlândia – MG é composto por 16 módulos fotovoltaicos dispostos em duas (2) strings da fabricante Canadian Solar, modelo CS6P- 260 com 260 W de potência cada somando 4,16 kWp. O inversor é da fabricante ABB, modelo UNO – 3.6 – TL – OUTD, esse sistema também está conectada à rede da CEMIG. Os dados foram colhidos entre os dias 01 e 08/10/2024.

Para realizar a coleta de dados foi utilizado o analisador de qualidade de energia do fabricante IMS, modelo PowerNet P-600, acoplado na saída do inversor. O analisador foi configurado para registrar os dados de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e potência aparente, componentes harmônicas e FP em um intervalo de 10 minutos, perfazendo 1008 leituras.

Os dados coletados pelo analisador foram armazenados diretamente no equipamento e posteriormente são transferidos para o computador para posterior cálculo de indicadores individuais em regime permanente – a Duração Relativa de Transgressão de tensão precária (DRP) e Duração Relativa de Transgressão de tensão crítica (DRC).

Entrada (antecedentes)

Duração relativa de transgressão de tensão crítica (DRC)

Universo (intervalo de valores nitidos/crisp): [0, 0,10, 22] [22, 5] [25, 30, 40, 40]

Conjunto difuso (valores difusos): Ruim, Amena e Boa.

Duração relativa de transgressão de tensão precária (DRP)

Universo (intervalo de valores nitidos/crisp): [0, 0, 20, 60] [0, 50, 60, 100] [60, 100, 100]

Conjunto difuso (valores difusos): Baixa, media e Boa

Saida (consequente)

Qualidade de Energia (Q_{el})

Universo: 0 a 95% e [0, 0, 5, 30][10, 30, 50][30, 50, 60, 60]

Conjunto difuso (valores difusos): Baixa, Aceitavel e Boa..

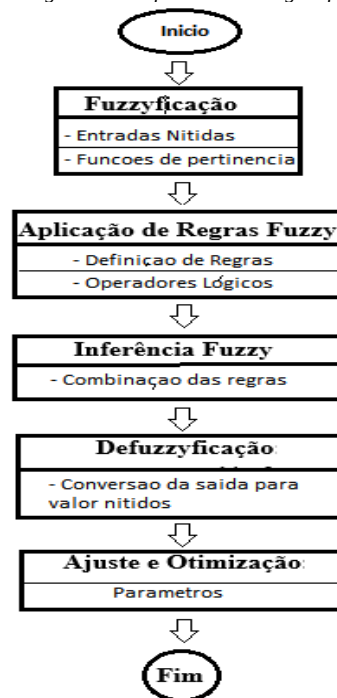
Regras de decisão pela lógica difusa:

1. Se o **DRC** [Ruim] E **DRP** [Baixo] então a **Q_{el}** será **Baixa**;
2. Se o **DRC** [Boa] OU **DRP** [Boa] então a **Q_{el}** será **Boa**;
3. Se o **DRC** [Amena] E **DRP** [Baixo] então a **Q_{el}** será **Baixa**

Usando o Python, segundo a figura 7, sequencialmente foram:

- i. Criadas as variáveis do problema;
- ii. Mapeadas as variáveis entre valores nítidos e difusos usando uma função de pertinência padrão (triângulo) no algoritmo proposto;
- iii. Criadas as funções de pertinência usando tipos variados;
- iv. Mostradas graficamente as funções de pertinência criadas, como ilustram as figuras 7, 8 e 9 a seguir.

Figura 5 - Fluxograma da implementacao lógica fuzzy [Autor]



V. RESULTADOS

Executado o ficheiro em Python, para a análise da Qualidade de energia, resultou em convergência dos cálculos, para um número Diante das condições de operação regras, verifica-se o comportamento das variáveis de entrada, ilustradas nas figuras 6, 7 e 8 respectivamente.

Figura 6 - Representação da distorção de tensão crítica (DRC) do sistema.

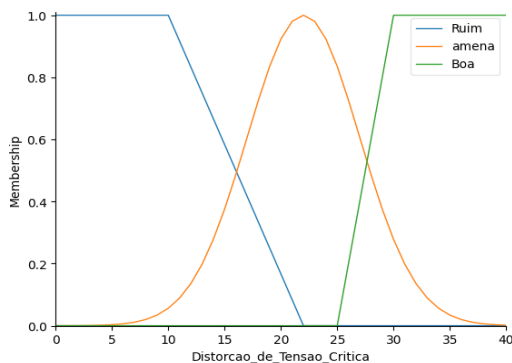


Figura 7 - Representação da distorção de tensão precaria (DRP) do sistema.

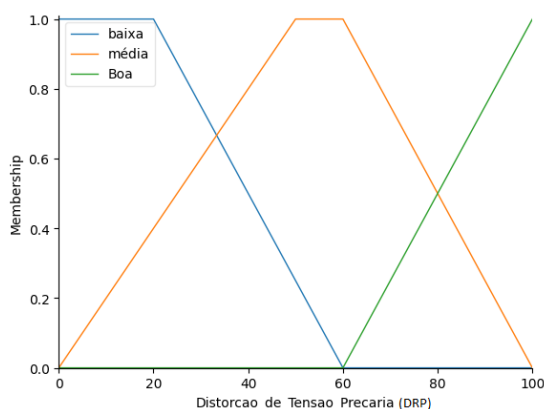


Figura 8 - Representação da Qualidade de energia, antes da inferencia de dados do sistema.

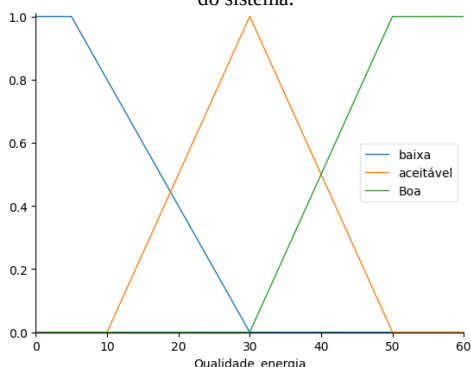
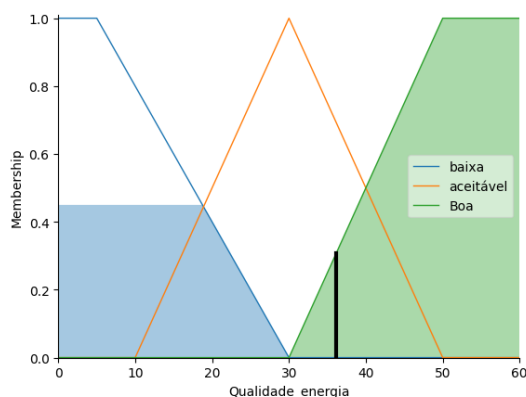


Figura 8 - Representação da Qualidade de energia, depois da inferencia de dados do sistema.



VI. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados permitiram concluir que a lógica nebulosa se destaca como uma ferramenta valiosa na modelagem de

sistemas elétricos de potência, proporcionando uma abordagem mais realista e adaptável. Através da incorporação eficaz da incerteza. Esta contribui para uma representação mais precisa do comportamento desses sistemas, oferecendo insights importantes para engenheiros e pesquisadores da área.

Em relação às análises realizadas, a variável que se destacou foi a potência reativa. Cada inversor apresenta características próprias, e devido ao fato de serem parametrizados nas fábricas, a única maneira de conhecer ou modificar a natureza da potência reativa injetada na rede é por meio de medições ou acesso ao software de controle do equipamento. No entanto, é importante destacar que todos os inversores devem atender às normas técnicas vigentes para serem utilizados em sistemas de fontes renováveis. Ademais, observou-se a necessidade de injeção de potência reativa na rede para o controle dos níveis de tensão, que variam em função da presença do sistema fotovoltaico (FV). Para isso, é sugerido que os inversores possuam bancos de capacitores e/ou indutores que fornecem a quantidade de potência reativa demandada pela rede, inclusive durante a noite, quando o sistema FV não gera energia elétrica. Considerando que as análises foram realizadas em sistemas FV operando em condições reais, sujeitas a intempéries e flutuações variáveis, conclui-se que os sistemas de fontes renováveis fornecem energia elétrica de qualidade, conforme as normas estabelecidas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado em parte pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), assim como a FAPEMIG- Bolsa APQ04929-22, CAPES - código financeiro 001 e CNPQ - Bolsa 406881/2022-7; aos quais os autores agradecem.

REFERÊNCIAS

- [1] AFONSO et. al. Qualidade de energia eléctrica. In: III Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento. 219-231 p. Maputo, Moçambique, 2003
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **PRODIST** - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. 4. ed. 2011.
- [3] EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS - **Análise da eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019)**. Rio de Janeiro, EPE, 2010.
- [4] INDRA, N.; ISMAIL, D.; SYAFRUDIN, M.; CHAN B. R.; SURYA, H. **Harmonic Monitoring at UniMAP Distributed Campus**. In: The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011), Shah Alam, Selangor, Malaysia: 6-7 June 2011.
- [5] NASCIMENTO M. A. P. **Avaliação de qualidade de energia de um sistema fotovoltaico numa rede elétrica**. Dissertação (Mestrado) – ISE de Lisboa, 2013.
- [6] PUFAL R. A. **Modelagem de cargas não lineares e rede de energia elétrica para simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Dissertação (Mestrado) – UFR, Porto Alegre, 2012.
- [7] SOUZA A. C. **Análise dos impactos da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na qualidade da energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- [8] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações - Sistemas isolados e conectados à rede**. 1ª. ed. São Paulo: Érica, 2012
- [9] Ribeiro, Eduardo **Do básico ao complexo: aprendendo a programar em Python com o ChatGPT**- TO: UFT, 2023.