



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SEBASTIÃO NAZÁRIO DE AZEVEDO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA EM PYTHON PARA
CARACTERIZAÇÃO QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA UNIDADE
CONSUMIDORA**

CARAÚBAS
2023

SEBASTIÃO NAZÁRIO DE AZEVEDO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA EM PYTHON PARA
CARACTERIZAÇÃO QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA UNIDADE
CONSUMIDORA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-árido como requisito
de obtenção de título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientadora: Érica Manguiera Lima

CARAÚBAS
2023

SEBASTIÃO NAZÁRIO DE AZEVEDO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA EM PYTHON PARA
CARACTERIZAÇÃO QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA UNIDADE
CONSUMIDORA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-árido como requisito
de obtenção de título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Defendido em 11 de outubro de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Érica Manguiera Lima
Doutora (UFERSA)

Nome do professor
Bacharel (UFERSA)

Nome do professor
Bacharel (UFERSA)

Dedicatória do texto, aqui será escrito a dedicatória para esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Edite e coloque aqui os agradecimentos às pessoas e/ou instituições que contribuíram para a realização do trabalho.

*"Ignorância completamente consciente é o
prelúdio para todos os avanços reais na
ciência."*

James Clerk Maxwell

RESUMO

A presença de dispositivos elétricos e eletrônicos cada vez mais sensíveis dentre as cargas utilizadas atualmente na rede elétrica, torna imprescindível o fornecimento de uma energia de qualidade, sem interrupções ou grandes variações nos valores de tensão. Isto posto, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) propõe procedimentos regulatórios para redes de distribuição, denominados Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que viabilizam a operação e manutenção desses sistemas. Em especial, o módulo 8 do PRODIST se dedica a verificação da qualidade de energia elétrica (QEE), estabelecendo limites e indicadores para assegurar o fornecimento de energia com qualidade e segurança para o consumidor e a concessionária. O estudo de QEE se dá usualmente por analisadores de rede associados a softwares, que são, em geral, pouco intuitivos, aumentando a possibilidade de erros humanos na análise dos indicadores. Nesse contexto, o presente trabalho aborda o desenvolvimento de uma rotina na linguagem de programação Python, com uma interface gráfica, que gera um relatório de análise da qualidade de energia de uma unidade consumidora, automatizando o processo e reduzindo a possibilidade de erros na interpretação dos dados. O software foi desenvolvido com base no PRODIST e testado utilizando dados reais. Os testes elaborados conseguiram comprovar a funcionalidade da rotina, conseguindo assim elaborar um relatório acerca da qualidade de energia da unidade consumidora.

Palavras-chave: Qualidade de energia. Python. Interface Gráfica. Automação.

ABSTRACT

Keywords:

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Faixas de tensão em relação à de referência	19
Figura 2 – Estrutura básica de um módulo Python	26
Figura 3 – Diagrama de classes UML para a rotina Python	28
Figura 4 – <i>Layout</i> da interface gráfica	30
Figura 5 – Analisador de qualidade de energia elétrica MINIPA modelo ET-5061C	31
Figura 6 – Tela inicial da interface gráfica	37
Figura 7 – Barra de seleção de arquivo	37
Figura 8 – Mensagens informativas	38
Figura 9 – Tabela de dados com os valores importados da planilha	38
Figura 10 – Menu suspenso com as funções do <i>software</i>	39
Figura 11 – Caixa de seleção de nível de tensão	40
Figura 12 – Gráfico com a classificação dos níveis de tensão	40
Figura 13 – Seleção dos níveis de tensão	41
Figura 14 – Resultado do cálculo dos indicadores de variação de tensão	42
Figura 15 – Análise do fator de potência	42
Figura 16 – Cálculo dos indicadores de distorções harmônicas	43
Figura 17 – Cálculo do indicador de desequilíbrio de tensão	44
Figura 18 – Cálculo do indicador de flutuação de tensão	44
Figura 19 – Análise da variação de frequência	45

LISTA DE CÓDIGOS

Código 1	Código que calcula os indicadores de variação de tensão	33
Código 2	Classe para verificação do fator de potência	34
Código 3	Função para cálculo dos indicadores de distorções harmônicas	35
Código 4	Função para cálculo do fator de desequilíbrio de tensão	36
Código 5	Função para cálculo do indicador de flutuação de tensão	36
Código 6	Função para análise da variação de frequência	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal 127V	20
Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal 220V	20
Tabela 3 – Pontos de conexão em Tensão Nominal 380V	20
Tabela 4 – Limites das distorções harmônicas totais de tensão	23
Tabela 5 – Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão	24
Tabela 6 – Limites para o indicador de flutuação de tensão	25
Tabela 7 – Indicadores de variação de tensão de fase para amostra 1	45
Tabela 8 – Indicadores de variação de tensão de fase para amostra 2	45
Tabela 9 – Indicadores de variação de tensão de linha para amostra 1	46
Tabela 10 – Indicadores de variação de tensão de linha para amostra 2	46
Tabela 11 – Classificação do fator de potência para amostra 1	46
Tabela 12 – Indicadores de distorções harmônicas para amostra 1	46
Tabela 13 – Indicadores de distorções harmônicas para amostra 2	47
Tabela 14 – Fatores de desequilíbrio de tensão para amostra 1	47
Tabela 15 – Fatores de desequilíbrio de tensão para amostra 2	47
Tabela 16 – Indicadores de flutuação de tensão para amostra 1	47
Tabela 17 – Indicadores de flutuação de tensão para amostra 2	47
Tabela 18 – Classificação da variação de frequência para amostra 1	48
Tabela 19 – Classificação da variação de frequência para amostra 2	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	ORGANIZAÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	18
2.2	QUALIDADE DA ENERGIA SEGUNDO O PRODIST	18
2.2.1	Variações de tensão em regime permanente	19
2.2.2	Fator de potência	21
2.2.3	Harmônicos	21
2.2.4	Desequilíbrio de tensão	24
2.2.5	Flutuação de tensão	25
2.2.6	Variação de frequência	25
2.3	PYTHON	25
2.3.1	Análise e processamento de dados	26
2.3.2	NumPy	26
2.3.3	Pandas	26
2.3.4	Matplotlib	27
2.3.5	PySide6	27
3	METODOLOGIA	28
3.1	DESENVOLVIMENTO DA ROTINA EM PYTHON	28
3.1.1	Escolha da linguagem de programação	28
3.1.2	Arquitetura	28
3.1.3	Implementação das classes	29
3.1.4	Uso de bibliotecas específicas	29
3.2	INTERFACE GRÁFICA	29
3.2.1	Desenvolvimento	29
3.2.2	Funcionalidades	30
3.2.3	Layout prévio	30
3.3	COLETA DE DADOS	30
3.3.1	Analisador de qualidade	30
3.3.2	Fonte de dados	31
3.3.3	Processamento dos dados	31
3.4	ANÁLISE DE DADOS	31

3.4.1	Uso das classes implementadas	31
3.4.2	Interpretação dos resultados	32
4	RESULTADOS	33
4.1	ROTINA EM PYTHON	33
4.2	DEMONSTRAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA	37
4.2.1	Gerar gráfico	39
4.2.2	Variação de tensão	41
4.2.3	Fator de potência	42
4.2.4	Distorções harmônicas	43
4.2.5	Desequilíbrio de tensão	43
4.2.6	Flutuação de tensão	44
4.2.7	Variação de frequência	45
4.3	Análise dos dados	45
4.3.1	Variação de tensão	45
4.3.2	Fator de potência	46
4.3.3	Distorções harmônicas	46
4.3.4	Desequilíbrio de tensão	47
4.3.5	Flutuação de tensão	47
4.3.6	Variação de frequência	48
5	CONCLUSÃO	49
	Referências	50

1 INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo o uso de energia elétrica tornou se imprescindível, pois vários equipamentos e meios de produções dependem dessa tecnologia. A evolução dos dispositivos eletrônicos sensíveis, como televisores, celulares, e até mesmo o surgimento de carros elétricos e outros meios de produção em grande escala, exigem uma energia de qualidade, sem interrupções ou variações de tensão relevantes. Sendo assim, faz se necessário um controle e verificação da qualidade da energia elétrica utilizada.

Para a garantia desse controle são adotados procedimentos, regulatórios, denominados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), no qual o modulo 8 se dedica à manutenção da qualidade da energia elétrica (QEE).

O PRODIST visa avaliar a qualidade da energia, levando em consideração, a qualidade do produto e qualidade do serviço. A qualidade do produto aborda os fenômenos, os limites e indicadores que possuem relação com a conformidade de tensão em regime permanente, além das perturbações na forma de onda de tensão. Por outro lado, a qualidade do serviço define limites e etapas relacionadas aos indicadores de continuidade e tempos de atendimento, bem como os conjuntos de unidades consumidoras (ANEEL, 2021).

Atualmente, sistemas fotovoltaicos estão sendo amplamente utilizados por unidades consumidoras. Esses sistemas utilizam inversores de frequência, que podem vir a promover problemas de distorção na alimentação da rede elétrica devido a presença de componentes harmônicas (DUGAN, 2004).

Para a avaliação da QEE, são colhidos dados por um analisador de qualidade de energia, que devem ser importados por um software para a análise das tensões e a presença de harmônicos, comparando-os com valores definidos pelo Modulo 8 do PRODIST. Muito embora esses softwares permitam uma análise visual dos dados, em sua maioria, não são capazes de analisar automaticamente os limites e indicadores, e produzir um diagnóstico da QEE com base no PRODIST.

Sendo assim, o presente trabalho propõe desenvolver uma rotina, em linguagem Python, com uma interface gráfica para automatização da verificação dos parâmetros obtidos por um analisador de QEE de acordo com os valores estabelecidos pela ANEEL, gerando para o usuário um relatório com a análise da QEE do local investigado.

1.1 MOTIVAÇÃO

Levando em consideração que hoje em dia a energia elétrica está cada vez mais presente e que vários dispositivos são sensíveis a variações nas formas de onda de tensão

e corrente, faz-se necessário que as concessionárias de energia se adequem aos limites e índices impostos pela ANEEL. Dessa forma, a análise de QEE é de suma importância para o fornecimento de energia aos consumidores de forma adequada e dentro dos padrões necessários ao funcionamento correto de seus equipamentos.

Um dos desafios na utilização dos *softwares* disponíveis para a análise de QEE, como o *Topview*, é a automatização da comparação dos valores obtidos pelo analisador de qualidade de energia com os valores indicados pelo Modulo 8 do PRODIST. Além disso, o uso dos dados fornecidos pelo analisador não é tão intuitivo, sendo necessário a interpretação desses parâmetros, aumentando a possibilidade da inserção do erro humano na análise. Sendo assim, busca-se reduzir a influência do operador (humano) no processo por meio da automatização por rotinas computacionais.

O avanço tecnológico permite, a automatização do processo de importação dos dados coletados pelo analisador de qualidade de energia e bem como a análise dos limites e indicadores de acordo com o Modulo 8 do PRODIST.

Portanto, desenvolver uma rotina para solucionar essa deficiência pode auxiliar a análise de QEE e o uso do próprio analisador em trabalhos futuros. Propõe-se então, neste trabalho, a construção de uma rotina em Python com uma interface gráfica para automatização da tarefa de comparação e verificação dos limites e indicadores, com base nos dados gerados pelo analisador de qualidade de energia e no Modulo 8 do PRODIST.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Desenvolver uma rotina com interface gráfica, em linguagem Python, para elaboração de um relatório para caracterização da situação da qualidade de energia elétrica de uma unidade consumidora.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Compreender o funcionamento da análise da qualidade de energia elétrica;
- ler os dados obtidos pelo analisador de qualidade de energia;
- gerar uma rotina em Python para elaboração de uma análise de QEE;
- criar uma interface gráfica que implemente a rotina gerada;
- elaborar teste para verificação do funcionamento do código desenvolvido;
- fazer simulações com valores reais para fins de comprovação do funcionamento da rotina desenvolvida.

1.3 ORGANIZAÇÃO

O sistema de organização desse trabalho estabelece uma divisão em 5 capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução do estudo da análise de QEE, além de detalhar a motivação e os objetivos desse trabalho. No segundo são apresentados os termos técnicos e a fundamentação teórica a respeito da qualidade de energia. A metodologia utilizada na elaboração desse trabalho é apresentada no terceiro capítulo e, no quarto, os resultados obtidos são demonstrados e analisados. Por último, o quinto capítulo apresenta as principais conclusões acerca do projeto desenvolvido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

A definição de qualidade de energia depende muito da perspectiva. Para uma concessionária a definição se relaciona com a confiança em seu sistema elétrico, já para um fabricante é o funcionamento correto de seu equipamento com base nas características de sua fonte de alimentação (DUGAN, 2004).

Para Bollen (2003), o termo qualidade de energia está relacionado a preocupação com desvio da tensão e corrente em relação aos valores ideais. Esses desvios são classificados em dois tipos: variações, desvios de tensões em escalas menores; e eventos, caracterizados como desvios em grande escala que acarreta interrupções.

Em consequência disso, a análise da qualidade de energia deve ser voltada para o consumidor. Portanto, um problema de qualidade de energia pode ser definido como aquele que manifesta variações de tensão, corrente ou frequência, resultando assim em uma falha ou um equipamento com mau funcionamento (DUGAN, 2004).

A qualidade da energia elétrica deve ser controlada, para que não venha a causar problemas para as cargas sensíveis dos clientes, e para que seja de fácil entendimento tanto para o fornecedor quanto para o consumidor da energia elétrica. Partindo disso, são tomados índices de qualidades de energia que estabeleçam a comparação dos níveis de tensão fornecidos pela concessionária, com os suportados pelos equipamentos do cliente (DUGAN, 2004).

2.2 QUALIDADE DA ENERGIA SEGUNDO O PRODIST

O PRODIST é a resolução normativa da ANEEL, cujo modulo 8 tem como principal objetivo estabelecer procedimentos concernentes à QEE e devem ser observados por todos que usufruem ou comercializam dessa energia (ANEEL, 2021).

Os procedimentos que são adotados no Modulo 8, caso não possuam uma resolução específica, se aplicam ao Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) e aos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI) (ANEEL, 2021). Segundo o PRODIST, a QEE pode ser dividida em qualidade do produto e qualidade do serviço. A qualidade do produto, dependendo se o regime é permanente ou transitório, trata os seguintes fenômenos que afetam à qualidade da onda de tensão (ANEEL, 2021):

- Regime permanente: tensão em regime permanente; fator de potência; harmônicos; desequilíbrio de tensão; flutuação de tensão; e variação de frequência (ANEEL, 2021).

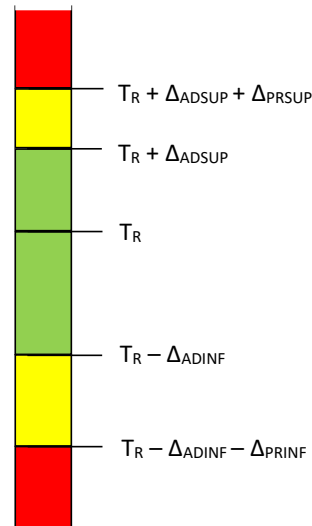
- Regime transitório: variações de tensão de curta duração (VTCD) (ANEEL, 2021).

Já a qualidade do serviço estabelece procedimentos que devem ser tomados pelas distribuidoras, com relação aos consumidores e a outras distribuidoras que venha a acessá-la (ANEEL, 2021).

2.2.1 Variações de tensão em regime permanente

A comparação da tensão obtida por leitura com os níveis de tensão classificados como adequados, precários e críticos diz respeito a conformidade de tensão. Essa classificação deve ser obtida em torno de valores próximos a tensão de referência, conforme Figura 1 (ANEEL, 2021).

Figura 1 – Faixas de tensão em relação à de referência



Fonte: ANEEL (2021)

Em que (ANEEL, 2021):

- T_R = Tensão de referência;
- a cor verde corresponde a faixa adequada de tensão;
- em amarelo são as faixas precárias de tensão;
- e em vermelho são as faixas críticas de tensão.

As faixas de variação da Tensão de Leitura (TL) para pontos de conexão em tensão nominal 127V, 220V e 380V podem ser observadas na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 (ANEEL, 2021).

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal 127V

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da TL (Volts)
Adequada	$117 \leq TL \leq 133$
Precária	$110 \leq TL < 117$ ou $133 < TL \leq 135$
Crítica	$TL < 110$ ou $TL > 135$

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2021).

Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal 220V

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da TL (Volts)
Adequada	$202 \leq TL \leq 231$
Precária	$191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233$
Crítica	$TL < 191$ ou $TL > 233$

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2021).

Tabela 3 – Pontos de conexão em Tensão Nominal 380V

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da TL (Volts)
Adequada	$350 \leq TL \leq 399$
Precária	$331 \leq TL < 350$ ou $399 < TL \leq 403$
Crítica	$TL < 331$ ou $TL > 403$

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2021).

Considerando 1008 leituras válidas com intervalos de 10 minutos, salvo as leituras expurgadas, os indicadores individuais para tensão em regime permanente são: a Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária (DRP) e a Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC). Onde para calcular DRP e DRC segue a Equação 1 e Equação 2 (ANEEL, 2021).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100 \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que (ANEEL, 2021):

- nlp = maior valor do número de leituras na faixa precária entre as fases;
- nlc = maior valor do número de leituras na faixa crítica entre as fases.

De acordo com o modulo 8 do PRODIST, os limites para os indicadores individuais de tensão em regime permanente são (ANEEL, 2021):

- $DRP_{Limite} = 3\%$;
- $DRC_{Limite} = 0,5\%$.

Caso as medições obtidas estiverem com DRP e DRC com valores superiores aos delimitados pelo PRODIST, a distribuidora deve compensar o titular da unidade consumidora conforme a Equação 3 (ANEEL, 2021).

$$\text{Comp} = \left[\left(\frac{DRP - DRP_{\text{Limite}}}{100} \right) \cdot k_1 + \left(\frac{DRC - DRC_{\text{Limite}}}{100} \right) \cdot k_2 \right] \cdot EUSD \quad (3)$$

Em que (ANEEL, 2021):

- $k_1 = 0$ se $DRP \leq DRP_{\text{Limite}}$ senão $k_1 = 3$;
- $k_2 = 0$ se $DRC \leq DRC_{\text{Limite}}$ senão: para consumidores atendidos em Baixa Tensão (BT) $k_2 = 7$; para consumidores atendidos em Média Tensão (MT) $k_2 = 5$; ou para consumidores atendidos em Alta Tensão (AT) $k_2 = 3$;
- $EUSD$ = valor do Encargo de Uso do Sistema de Distribuição, referente ao último mês colhido a medição.

2.2.2 Fator de potência

Considerando um ângulo de fase θ entre a corrente e a tensão, o cosseno desse ângulo é denominado fator de potência (fp). Sabe-se que, a depender do sinal de $\cos\theta$, o fp pode determinar se a corrente está atrasada ou adiantada em relação a tensão. Dessa forma, para um sistema no qual a corrente está atrasada em relação a tensão é dito que o fator de potência é indutivo, em contrapartida, se estiver adiantada o fator de potência é capacitivo (GLOVER; OVERBYE; SARMA, 2017).

O fator de potência pode ser calculado através da Equação 4 (GLOVER; OVERBYE; SARMA, 2017):

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4)$$

Em que (GLOVER; OVERBYE; SARMA, 2017):

- P = potência ativa;
- Q = potência reativa.

Uma outra forma de calcular o fator de potência é seguindo a Equação 5, fornecida pelo PRODIST (ANEEL, 2021).

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (5)$$

Onde, EA e ER são as energias ativa e reativa, respectivamente (ANEEL, 2021).

O PRODIST determina que, para consumidores do Grupo A com tensão menor que 230 kV, o fator de potência deve estar entre 0,92 e 1,00, tanto para indutivo quanto para capacitivo (ANEEL, 2021).

2.2.3 Harmônicos

Harmônicos são definidos como correntes ou tensões senoidais que possuem frequências com valores múltiplos da frequência fundamental de um sistema. Geralmente esses

valores são múltiplos de 50 ou 60 Hz (FUCHS; MASOUM, 2015). Sendo assim, para um sistema de 60 Hz que possua 5 harmônicos tem se valores de tensões para frequências de 60, 120, 180, 240 e 300 Hz respectivamente.

As principais causas de harmônicos em sistemas são (FUCHS; MASOUM, 2015):

- carga não lineares, por exemplo: retificadores ou inversores;
- carga residenciais, como televisores e computadores;
- dispositivos de controle com mau funcionamento;
- perdas em transformadores e capacitores;
- ruídos em motores.

A presença de equipamentos com características não lineares altera a forma de onda, produzindo ondas não senoidais. Essas formas de ondas podem ser expressas em séries de Fourier, em que cada termo representa um componente harmônico da onda distorcida (FUCHS; MASOUM, 2015).

Tanto para as séries de Fourier, como para os harmônicos de uma função não senoidal, existem componentes pares e ímpares que se equivalem. Quando a série de Fourier possui apenas componentes ímpares, quer dizer que o formato de onda dos semiciclos positivos e negativos são iguais. Porém quando existe a presença eventual de componentes pares, significa que existe algum problema no sistema (FUCHS; MASOUM, 2015).

Quando há presença de harmônicos triplos, denominados harmônicos ímpares múltiplos de 3, significa que existe a presença de corrente na linha de neutro podendo acarretar sobrecarga do respectivo condutor (FUCHS; MASOUM, 2015).

Para o PRODIST, quando há ocorrência de distorções harmônicas o formato da onda analisado possui deformações em comparação com os formatos das tensões e correntes puramente senoidais (ANEEL, 2021).

Sendo assim, adotam-se alguns indicadores para as distorções harmônicas, nos quais, para uma ordem h , o indicador de distorção harmônica individual ($DIT_h\%$) pode ser calculado pela Equação 6 (ANEEL, 2021):

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que V_h corresponde a tensão harmônica de ordem h e V_1 é a componente fundamental da tensão (ANEEL, 2021).

Para calcular a distorção harmônica total de tensão ($DTT\%$) usa a Equação 7 (ANEEL, 2021):

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (7)$$

Para isso, h corresponde as ordens harmônicas que variam de 2 até h_{max} (ordem harmônica de maior valor), V_h é a tensão harmônica de ordem h e V_1 a componente fundamental da tensão (ANEEL, 2021).

Levando em consideração apenas os componentes pares não múltiplos de 3, o PRODIST determina que a distorção harmônica total de tensão ($DTT_p\%$) deve ser calculada da seguinte Equação 8 (ANEEL, 2021):

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde, h representa as ordens harmônicas pares e não múltiplas de 3, com h_p sendo o maior valor da ordem harmônica, V_h a tensão harmônica de ordem h e V_1 a componente fundamental da tensão (ANEEL, 2021). Assim como para as componentes pares, as ímpares possuem um indicador de distorção harmônica total de tensão ($DTT_i\%$), determinado pela Equação 9 (ANEEL, 2021):

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (9)$$

Logo, h simboliza as ordens harmônicas ímpares e não múltiplas de 3 partindo do 5, com h_i sendo o maior valor da ordem harmônica, V_h a tensão harmônica de ordem h e V_1 a componente fundamental da tensão (ANEEL, 2021).

Por último, levando em consideração apenas as componentes múltiplas de 3, o indicador referente é determinado pela Equação 10 (ANEEL, 2021):

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (10)$$

Sabendo-se que, h representa as ordens harmônicas múltiplas de 3, com h_3 como o maior valor da ordem harmônica múltipla de 3, V_h a tensão harmônica de ordem h e V_1 a componente fundamental da tensão (ANEEL, 2021).

Levando em consideração as 1008 leituras válidas determinadas pelo PRODIST, deve ser calculado o percentil 95 para os indicadores de distorções harmônicas total de tensão. em seguida, os valores obtidos devem ser comparados com os limites estabelecidos pelo próprio PRODIST, conforme Tabela 4, em que V_n é a tensão nominal do sistema (ANEEL, 2021).

Tabela 4 – Limites das distorções harmônicas totais de tensão

Indicador	$V_n \leq 2,3kV$	$2,3kV \leq V_n < 69kV$	$69kV \leq V_n < 230kV$
$DTT_{95\%}$	10,00%	8,00%	5,00%
$DTT_{p95\%}$	2,50%	2,00%	1,00%
$DTT_{i95\%}$	7,50%	6,00%	4,00%
$DTT_{395\%}$	6,50%	5,00%	3,00%

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2021).

2.2.4 Desequilíbrio de tensão

O PRODIST define o desequilíbrio de tensão como qualquer alteração nos valores das amplitudes das tensões de fase ou na defasagem de um sistema trifásico (ANEEL, 2021). De forma análoga, para Fuchs e Masoum (2015) caso um sistema trifásico não tenha as tensões com valores iguais de amplitude e defasagem de 120 graus entre si, existe um desequilíbrio de tensão nesse sistema.

As principais consequências do desequilíbrio de tensão são mal funcionamento e danos a vida útil dos equipamentos elétricos. Já a principal fonte de desequilíbrio são as cargas elétricas, tanto as lineares (motores de indução) quanto as não lineares (conversores estáticos CA-CC) (PAULILO, 2013).

Os dois principais tipos de origens de desequilíbrio de cargas são: estrutural e funcional. O termo estrutural diz respeito a qualquer desequilíbrio na rede, seja transformador ou linhas de transmissão que estejam desbalanceadas. Já funcional remete à presença de cargas desequilibradas na rede, em que as fases não estão corretamente balanceadas (REZENDE; SAMESIMA, 2012).

Para calcular o Fator de Desequilíbrio de Tensão ($FD\%$), o PRODIST segue a Equação 11 (ANEEL, 2021).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (11)$$

Em que, V_- e V_+ são as tensões eficazes para sequência negativa e positiva, respectivamente, considerando a frequência fundamental. Alternativamente, tem-se a Equação 12 (ANEEL, 2021).

$$FD\% = 100 \cdot \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (12)$$

Onde o valor de β é determinado pela Equação 13 (ANEEL, 2021).

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (13)$$

Em que, V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são as tensões de linha eficazes para frequência fundamental (ANEEL, 2021).

Assim como os outros limites, para o PRODIST deve ser calculado o percentil 95 para os 1008 valores do $FD\%$ obtidos. Com isso, o valor limite para o $FD95\%$ pode ser observado na Tabela 5, em que V_n é a tensão nominal (ANEEL, 2021).

Tabela 5 – Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão

Indicador	$V_n \leq 2,3kV$	$2,3kV < V_n < 230kV$
$FD95\%$	3,00%	2,00%

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2021).

2.2.5 Flutuação de tensão

Quando ocorre mudanças repentinas nos valores de pico ou eficazes da tensão, caracteriza-se esse fenômeno como flutuação de tensão. Para o PRODIST, o indicadores de flutuação são o P_{st} , P_{lt} e $P_{st95\%}$, com o ultimo sendo o indicador utilizado para verificação do desempenho do sistema, podendo ser calculado pela Equação 14 (ANEEL, 2021).

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (14)$$

Onde, os valores de P, determinam o nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado no percentual do tempo referente ao seu indicador (ANEEL, 2021).

O limite para o indicador de flutuação está determinado pela Tabela 6.

Tabela 6 – Limites para o indicador de flutuação de tensão

Indicador	$V_n \leq 2,3kV$	$2,3kV < V_n < 69kV$	$69kV \leq V_n < 230kV$
$P_{st95\%}$	1,0pu	1,5pu	2,0pu

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2021).

2.2.6 Variação de frequência

Para que não haja desvio da frequência do sistema em níveis fora da variação permitida, faz-se necessário que exista equilíbrio entre a geração e carga. Esse desvio pode ser proveniente de mudanças na velocidade de rotação de geradores eletromecânicos. Outros possíveis motivos de variações na frequência são falhas no sistema de transmissão de energia (FUCHS; MASOUM, 2015).

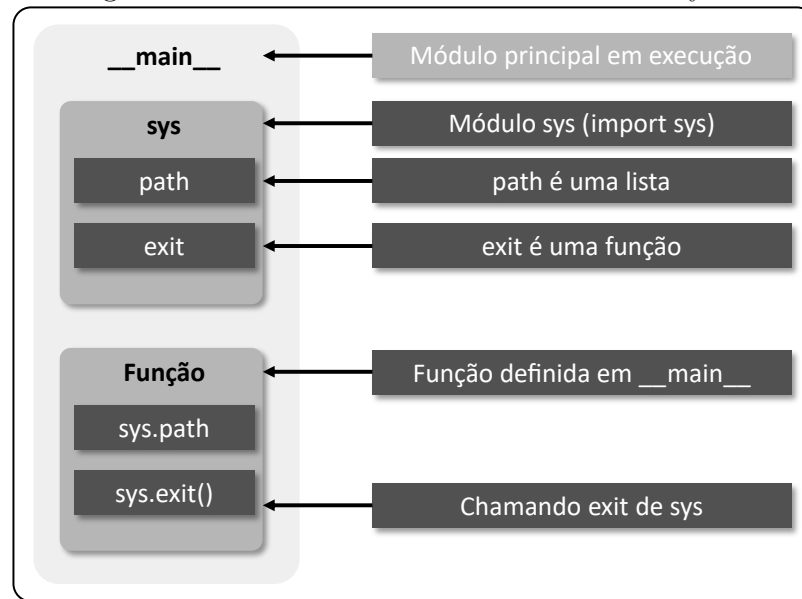
Para regime permanente e condições normais, o PRODIST determina que o sistema de distribuição deve operar em níveis de frequência entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (ANEEL, 2021).

2.3 PYTHON

Python é uma linguagem de programação de alto nível e interpretada, possuindo uma escrita mais simples, de fácil leitura e com uma grande variedade de módulos (bibliotecas) para execução das mais variadas tarefas. Ademais, é dotada de estruturas de dados de alto nível, como dicionários, listas e tuplas (BORGES, 2014).

Em Python, os arquivos-fonte que são importados e executados em outro arquivo Python, são denominados de módulos. A estrutura simplificada de um modulo pode ser observada na Figura 2 (BORGES, 2014).

Figura 2 – Estrutura básica de um módulo Python



Fonte: Borges (2014)

2.3.1 Análise e processamento de dados

Quando se trata de análise e processamento de dados a linguagem Python é uma das mais utilizadas, possuindo uma grande comunidade ativa e desenvolvida na área. Um termo de grande importância é dados tabulares, também conhecido como planilhas. Por meio dos dados tabulares é possível armazenar tipos diferentes para cada coluna (string, número, data), além de salvar esses em arquivos, seja CSV ou XLS (MCKINNEY, 2022).

As bibliotecas mais comuns para a análise de dados são: NumPy; Pandas; e Matplotlib (MCKINNEY, 2022).

2.3.2 NumPy

A NumPy (Numerical Python) é uma biblioteca Python utilizada para cálculos numéricos, onde tem como principal objetivo trabalhar com arrays multidimensionais. A sua versão 1.0 foi lançada no final de 2006 pelo seu fundador, Travis Oliphant (OLIPHANT et al., 2006).

Esses arrays multidimensionais, ou ndarray (N-dimensional array), são objetos com um número de elementos predeterminados, no qual cada elemento possui um conjunto de vetores de mesmo tamanho e cada vetor só possui itens de mesmo tipo de dados (NELLI, 2023).

2.3.3 Pandas

Quando se trata de análise de dados o Pandas é uma das bibliotecas mais utilizadas, principalmente por ser open source (código aberto). Essa biblioteca foi desenvolvida por

uma grande comunidade de desenvolvedores, sendo primeiramente elaborada por Wes McKinney em 2008. Destaca-se que, em um nível mais baixo, a biblioteca utiliza-se de várias outras bibliotecas, dentre elas o NumPy (MCKINNEY, 2022).

O Pandas tem como especialidade trabalhar com DataFrame e Series, sendo essas as duas principais estruturas de dados dessa biblioteca (NELLI, 2023).

As Series são objetos que representam estruturas de dados com uma dimensão, semelhante a arrays porém com funções extras. Já os DataFrame são objetos com estruturas de dados mais complexas, possuindo várias dimensões (NELLI, 2023).

2.3.4 Matplotlib

A grande especialidade dessa biblioteca é desenvolver visualizações de dados em formato de gráficos em duas dimensões, podendo até desenvolver gráficos 3D. Ela consegue ter resultados similares a gráficos produzidos em softwares como Matlab, podendo exportá-los em vários formatos como PNG, PDF, SVG e ESP (NELLI, 2023).

Para a data science (ciência de dados), o Matplotlib é uma das bibliotecas fundamentais em conjunto com o Pandas e NumPy, tendo ferramentas como o pyplot que tem funções com capacidade de plotar gráficos com qualidade similar ao Matlab (BISONG, 2019).

2.3.5 PySide6

O PySide6 é a uma biblioteca feita em Python em cima da biblioteca Qt do C++, atualmente desenvolvida pela The Qt Company. Ela tem objetivo criar interfaces gráficas altamente personalizáveis e de grande versatilidade, além de ser uma biblioteca de código aberto e multiplataformas podendo ser executada no Linux, Windows e Mac (FITZPATRICK, 2022).

3 METODOLOGIA

Nesta seção está expressa a abordagem metodológica utilizada na elaboração da rotina em Python contendo uma interface gráfica, em conjunto com o cálculo dos indicadores determinados pelo Módulo 8 do PRODIST. Segue uma divisão em etapas lógicas, que contemplam desde o planejamento e estruturação até a validação dos resultados obtidos.

3.1 DESENVOLVIMENTO DA ROTINA EM PYTHON

3.1.1 Escolha da linguagem de programação

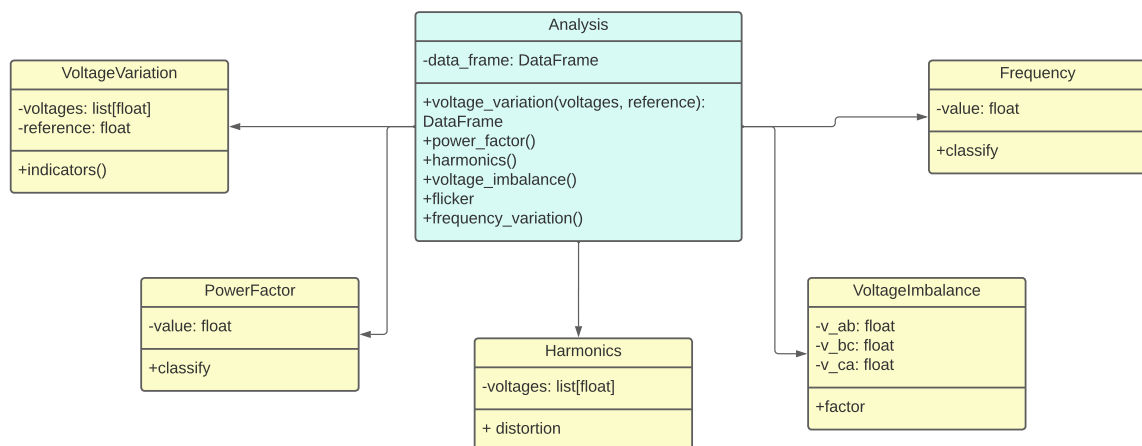
A linguagem Python foi escolhida por ser de fácil manuseio e possuir grandes variedades de bibliotecas voltadas a análise de dados e construção de interfaces.

3.1.2 Arquitetura

Para implementação da rotina foi escolhido utilizar uma abordagem modular e composta por classes, facilitando a organização e manutenção do código. A arquitetura geral pode ser dividida em 3 partes principais: a interface gráfica, as classes para cálculo dos indicadores e uma classe geral de controle das análises dos indicadores.

A Figura 3 mostra um diagrama UML (*Unified Modeling Language*) para a arquitetura de classes desenvolvidas.

Figura 3 – Diagrama de classes UML para a rotina Python



Fonte: Autoria própria

As classes na Figura 3. A maior classe (*Analysis*) é a principal, responsável pela conexão da rotina com a interface gráfica. As demais classes, respectivamente são: *VoltageVariation* para cálculo do indicador de variação de tensão; *PowerFactor* para análise do fator de potência; *Harmonics* para determinar os indicadores de distorções

harmônicas; *VoltageImbalance* para cálculo do fator de desequilíbrio de tensão e; *Frequency* para determinar a classificação da variação de frequência.

O indicador de flutuação de tensão é determinado pela função *flicker* dentro da classe principal.

3.1.3 Implementação das classes

Foram desenvolvidas classes para cada tipo de indicador determinado pelo Módulo 8 PRODIST, com exceção para o indicador de flutuação de tensão que é calculado dentro da classe principal, onde cada uma fica responsável por realizar os cálculos específicos para seu indicador. As classes foram desenvolvidas para os indicadores:

- variação de tensão (DRC e DRP);
- fator de potência: verificar se os valores de fator de potência estão condizentes com os níveis adequados;
- distorções harmônicas ($DTT_{95\%}$, $DTT_p95\%$, $DTT_i95\%$ e $DTT_395\%$);
- desequilíbrio de tensão ($FD95\%$);
- variação de frequência: verificar se os valores das frequências estão dentro da faixa adequada.

A classe geral de controle das análises age como um intermediário entre a interface gráfica e as classes que calculam os indicadores, capitando os parâmetros de entrada fornecidos pela interface e selecionando qual classe de indicador será instanciada.

3.1.4 Uso de bibliotecas específicas

Dentre as bibliotecas mais utilizadas nesse trabalho se destacam:

- Pandas: utilizada para análise dos dados, XLS ou CSV, colhidos pelo analisador de QEE;
- NumPy: utilizada para verificação das informações contidas dentro dos arquivos, calculando valores de percentis ou tamanho das bases de dados;
- Matplotlib: utilizado para geração de gráficos das tensões;
- PySide6: utilizada para a criação da interface gráfica responsável pela visualização e manuseio da rotina elaborada na linguagem Python.

3.2 INTERFACE GRÁFICA

3.2.1 Desenvolvimento

Foi desenvolvido uma estrutura modular para geração da interface gráfica através da biblioteca PySide6, por ser uma biblioteca de código aberto e de alta personalização.

3.2.2 Funcionalidades

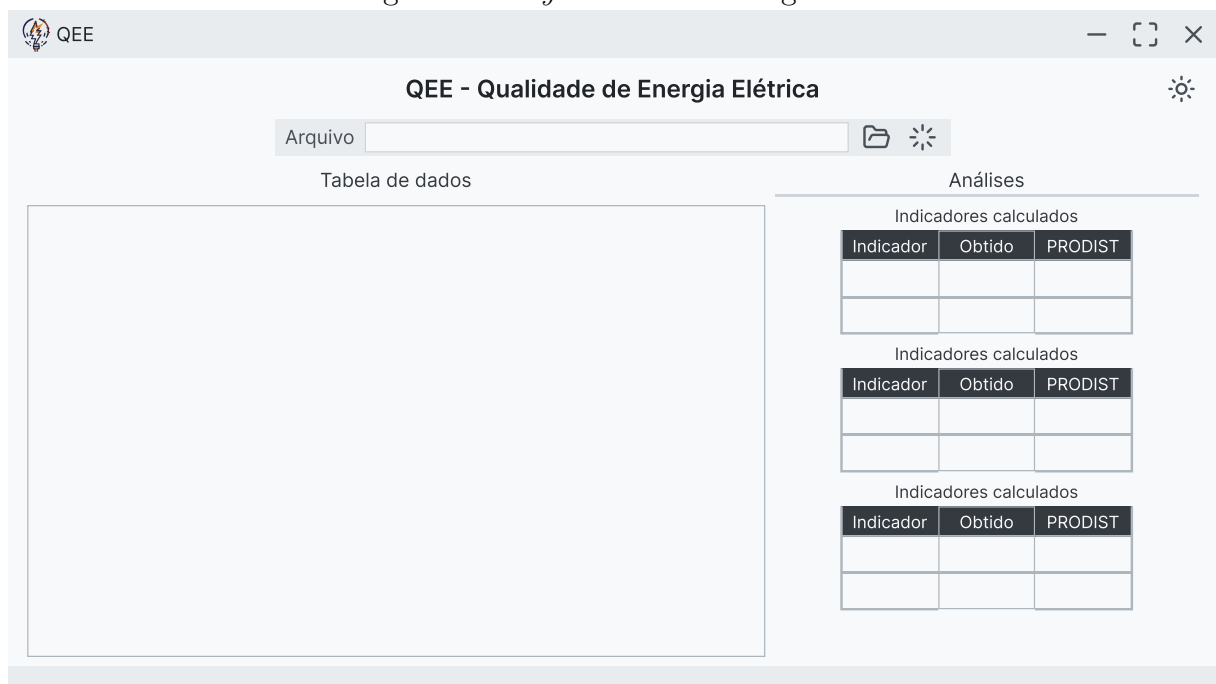
A interface gráfica permite que o usuário interaja com a rotina criada, importando uma planilha CSV ou XLS, para uma tabela e selecione os parâmetros que deseja para calcular os indicadores.

A interface consegue visualizar gráficos das tensões medidas e gerar um relatório em pdf com os valores dos indicadores calculados, além de salvar os valores dos indicadores em formatos diferentes, seja TXT, PDF, CSV ou XLS.

3.2.3 Layout prévio

O layout prévio da interface segue a Figura 4, em que possui uma tabela, para mostrar os dados importados da planilha, e uma barra na lateral direita, onde conterà os resultados da análise dos indicadores.

Figura 4 – *Layout* da interface gráfica



Fonte: Autoria própria

3.3 COLETA DE DADOS

3.3.1 Analisador de qualidade

Existem vários modelos de analisadores de qualidade de energia, dentre eles o instrumento MINIPA modelo ET-5061C, é um analisador de rede construído pelo fabricante MINIPA respeitando a norma de segurança EN-61010. Esse dispositivo consegue visualizar em tempo real parâmetros elétricos, mostra sinais em forma de gráficos, histogramas, diagramas vetoriais e consegue salvar esses dados para que possam ser visualizados e

analisados em outros softwares (LTDA, 2019). Na Figura 5 apresenta-se um exemplo desse modelo.

Figura 5 – Analisador de qualidade de energia elétrica MINIPA modelo ET-5061C



Fonte: LTDA (2019)

3.3.2 Fonte de dados

Os dados colhidos para análise da ferramenta, foram obtidos por meio de um analisador de QEE instalado no bloco de professores I desta universidade. O estudo da fonte de dados teve o objetivo de compreender os aspectos organizacionais e gerar a rotina de importação e análise desses dados, buscando padrões que tornem essa rotina adequada a quaisquer medições realizadas.

3.3.3 Processamento dos dados

Antes da análise, os dados foram pré-processados e selecionados apenas as 1008 leituras válidas, conforme determinado pelo PRODIST. Também foram unidas todas as planilhas, extraídas do analisador de QEE, em uma única planilha (XLS ou CSV) com todos os valores medidos.

3.4 ANÁLISE DE DADOS

3.4.1 Uso das classes implementadas

Com a planilha única criada, os valores foram importados para a classe geral de controle das análises, através da interface gráfica, e convertida em um DataFrame para ser usado dentro das funções que instanciam as classes para cálculo dos indicadores. Nessas funções, além da instância das classes de indicadores, os valores dos DataFrame são convertidos em listas de valores numéricos para que as classes pré-determinadas possam executar os cálculos dos indicadores.

3.4.2 Interpretação dos resultados

Consistiu na comparação dos indicadores calculados com os fornecidos pelo PRO-DIST. Permitindo assim determinar a situação da qualidade de energia da unidade consumidora analisada.

4 RESULTADOS

Nesse capítulo serão abordados os resultados obtidos perante a utilização do código desenvolvido com alimentação dos dados colhidos pelo analisador de qualidade de energia.

4.1 ROTINA EM PYTHON

Tendo como destaque o código implementado, serão apresentados as principais funções desenvolvidas para cálculo dos indicadores de: variação de tensão; fator de potência; distorções harmônicas; desequilíbrio de tensão; flutuação de tensão e; variação de frequência.

O Código 1 implementa a Equação 1 e Equação 2, que determina os indicadores DRP e DRC. Esse função é chamada dentro de um *loop* por 1008 vezes na classe "Analysis".

Código 1 – Código que calcula os indicadores de variação de tensão

```

50 def indicators(self) -> dict[Literal['DRP', 'DRC'], float]:
51     """
52     Calcula os indicadores Duracao Relativa de Transgressao
53     para tensao precaria e critica
54     """
55
56     numbers = self.reading_number()
57
58     self.__drp = (numbers[1] / 1008) * 100
59     self.__drc = (numbers[2] / 1008) * 100
60
61     return {'DRP': self.__drp, 'DRC': self.__drc}

```

Fonte: Autoria própria.

Para determinação da análise do fator de potência foi desenvolvida a classe do Código 2. Essa classe classifica o fator de potência em crítico e adequado a depender se não estiver nos limites determinados pelo PRODIST.

Código 2 – Classe para verificação do fator de potência

```
5 class PowerFactor:
6     """Fator de potencia"""
7
8     def __init__(self, value: float) -> None:
9         self.value = value
10
11     def classify(self) -> PowerFactorClassifyType:
12         """Classifica o fator de potencia"""
13
14         if self.value < prodist.FP_INDUTIVO:
15             return 'Critico'
16         else:
17             return 'Adequado'
```

Fonte: Autoria própria.

A função principal da classe utilizada para determinar os indicadores de distorções harmônicas pode ser observada no Código 3. Essa função percorre todos os harmônicos por meio de um *loop for* para então determinar o indicador de acordo com as equações fornecidas pelo PRODIST.

Código 3 – Função para cálculo dos indicadores de distorções harmônicas

```

16 def distortion(
17     self,
18 ) -> dict[Literal['DTT', 'DTTp', 'DTTi', 'DTT3'], float]:
19     """Calcula as Distorcao harmonicas total de tensao"""
20
21     total_sum: float = 0
22     total_sum_even_not_multiple_3: float = 0
23     total_sum_odd_not_multiple_3: float = 0
24     total_sum_multiple_3: float = 0
25
26     for index, voltage in enumerate(self.voltages):
27         order = index + 1
28
29         if order >= 2:
30             total_sum += voltage**2
31
32         if order % 2 == 0 and order % 3 != 0:
33             total_sum_even_not_multiple_3 += voltage**2
34
35         if order >= 5 and order % 2 != 0 and order % 3 != 0:
36             total_sum_odd_not_multiple_3 += voltage**2
37
38         if order % 3 == 0:
39             total_sum_multiple_3 += voltage**2
40
41     return {
42         'DTT': self.individual_harmonic_distortion(total_sum **
43             (1 / 2)),
44         'DTTp': self.individual_harmonic_distortion(
45             total_sum_even_not_multiple_3 ** (1 / 2)
46         ),
47         'DTTi': self.individual_harmonic_distortion(
48             total_sum_odd_not_multiple_3 ** (1 / 2)
49         ),
50         'DTT3': self.individual_harmonic_distortion(
51             total_sum_multiple_3 ** (1 / 2)
52         ),
53     }

```

Fonte: Autoria própria.

O Código 4 foi desenvolvido para determina o fator de desequilíbrio de tensão FD , por meio da aplicação da Equação 12.

Código 4 – Função para cálculo do fator de desequilíbrio de tensão

```

9  def factor(self) -> float:
10     """Calcular o FD"""
11
12     beta = (self.v_ab**4 + self.v_bc**4 + self.v_ca**4) / (
13         (self.v_ab**2 + self.v_bc**2 + self.v_ca**2) ** 2
14     )
15
16     numerator = 1 - (3 - 6 * beta) ** (1 / 2)
17     denominator = 1 + (3 - 6 * beta) ** (1 / 2)
18
19     value = float(100 * ((numerator / denominator) ** (1 / 2)))
20
21     return value

```

Fonte: Autoria própria.

Dentro da classe responsável pela análise de todos os indicadores foi criado uma função para determinação do indicador de flutuação de tensão, como pode ser observado no Código 5.

Código 5 – Função para cálculo do indicador de flutuação de tensão

```

140 def flicker(self, label: str) -> pd.DataFrame:
141     """Calcula o flicker"""
142
143     psts: list[float] = self.data_frame[label].to_list()
144
145     pst_95 = float(np.percentile(psts, 95))
146
147     data = {
148         "Indicador": ["Pst95%"],
149         "Obtido": [f"{pst_95:.2f}pu"],
150         "PRODIST": [f"{prodist.P_ST_LIMIT:.2f}pu"],
151     }
152
153     return pd.DataFrame(data)

```

Fonte: Autoria própria.

Para aplicação da análise de variação de frequência, foi desenvolvido o Código 6. Ele classifica a frequência em adequada, baixa e alta, através de uma comparação com os níveis fornecidos pelo PRODIST.

Código 6 – Função para análise da variação de frequência

```

12 def classify(self) -> FrequencyClassifyType:
13     """Classifica a frequencia"""
14
15     if self.value < prodist.FREQUENCY_LIMIT[0]:
16         self.__classify = "Baixa"
17     elif self.value > prodist.FREQUENCY_LIMIT[1]:
18         self.__classify = "Alta"
19     else:
20         self.__classify = "Adequada"
21
22     return self.__classify

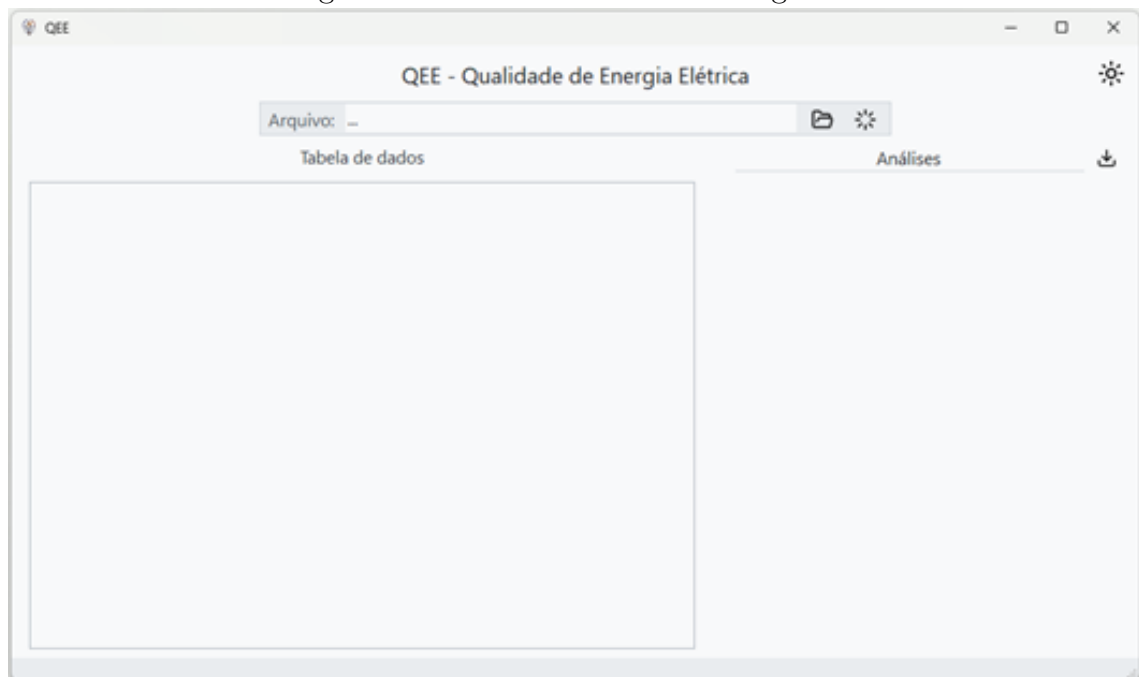
```

Fonte: Autoria própria.

4.2 DEMOSTRAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA

A Figura 6 demonstra a visão geral da interface gráfica desenvolvida.

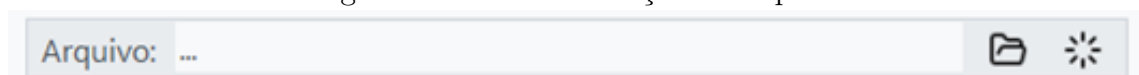
Figura 6 – Tela inicial da interface gráfica



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6, observa-se uma barra de seleção de arquivo, Figura 7, utilizada para digitar o caminho referente a planilha de dados, um botão para abrir o gerenciador de arquivos do sistema operacional e um botão para carregar o arquivo quando selecionado.

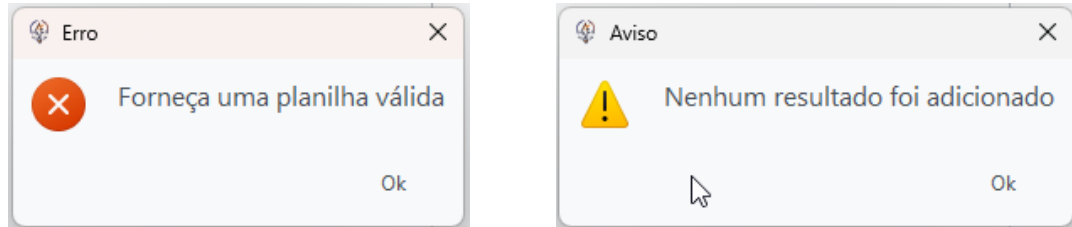
Figura 7 – Barra de seleção de arquivo



Fonte: Autoria própria.

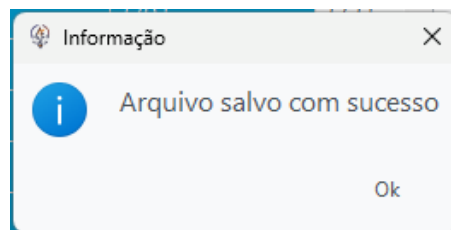
A interface contém mensagens informativas, para situações de inconsistência em valores fornecidos e confirmações de ações realizadas, como pode ser observado na figura.

Figura 8 – Mensagens informativas



(a) Mensagem de erro

(b) Mensagem de aviso



(c) Mensagem de informação

Fonte: Autoria própria.

A Figura 8a mostra o exemplo para as mensagens de erros, enquanto Figura 8b para mensagem de aviso e Figura 8c para mensagens de informações.

Quando for selecionada uma planilha, que seja aceita pela interface, seus dados aparecem na tabela de dados, como mostra Figura 9.

Figura 9 – Tabela de dados com os valores importados da planilha

QEE - Qualidade de Energia Elétrica

Arquivo: D:/www/github/qee/data/data1.csv

Tabela de dados

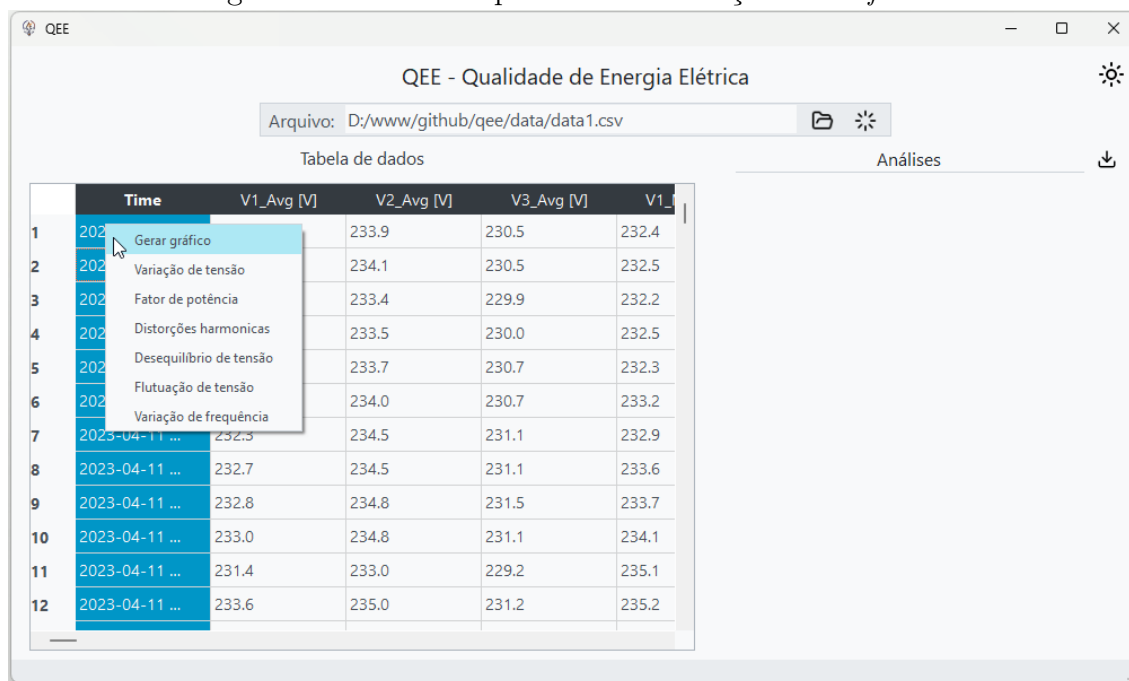
	Time	V1_Avg [V]	V1_Max [V]	V1_Min [V]	V2_
1	2023-04-11 ...	231.9	232.4	230.5	233.9
2	2023-04-11 ...	232.0	232.5	231.4	234.1
3	2023-04-11 ...	231.3	232.2	230.6	233.4
4	2023-04-11 ...	231.7	232.5	231.0	233.5
5	2023-04-11 ...	231.8	232.3	230.5	233.7
6	2023-04-11 ...	232.4	233.2	231.6	234.0
7	2023-04-11 ...	232.3	232.9	231.6	234.5
8	2023-04-11 ...	232.7	233.6	229.0	234.5
9	2023-04-11 ...	232.8	233.7	229.6	234.8
10	2023-04-11 ...	233.0	234.1	230.4	234.8
11	2023-04-11 ...	231.4	235.1	227.8	233.0
12	2023-04-11 ...	233.6	235.2	230.0	235.0

Análises

Fonte: Autoria própria.

A tabela da Figura 9 é a base para utilização da interface. Ao clicar sobre ela com o botão direito do mouse, aparece um menu suspenso com as funções (Gerar gráfico, Variação de tensão, Fator de potência, Distorções harmônicas, Desequilíbrio de tensão, Flutuação de tensão e Variação de frequência), como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Menu suspenso com as funções do *software*

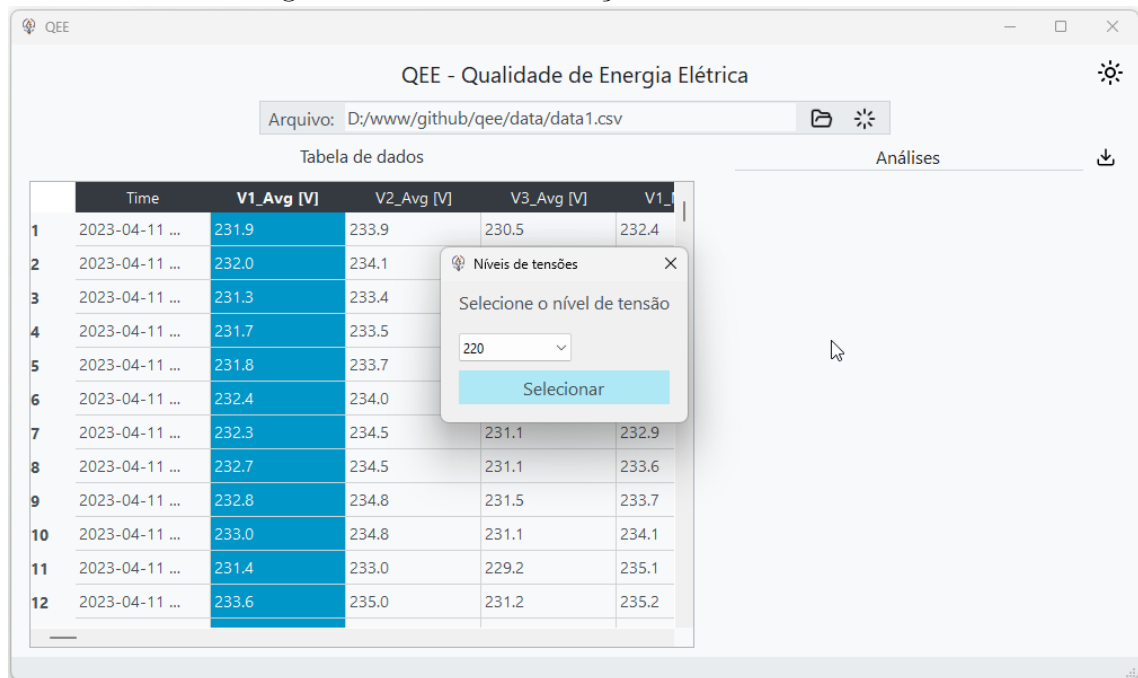


Fonte: Autoria própria.

4.2.1 Gerar gráfico

Nessa função é possível visualizar um gráfico contendo uma classificação das tensões em adequada, precária ou crítica. Ao clicar na função “Gerar gráfico”, sobre um parâmetro de tensão dentro da tabela, aparecerá uma caixa de seleção de nível de tensão, Figura 11, para seleção da tensão de referência a qual a interface utiliza para verificar a classificação dos níveis de tensões.

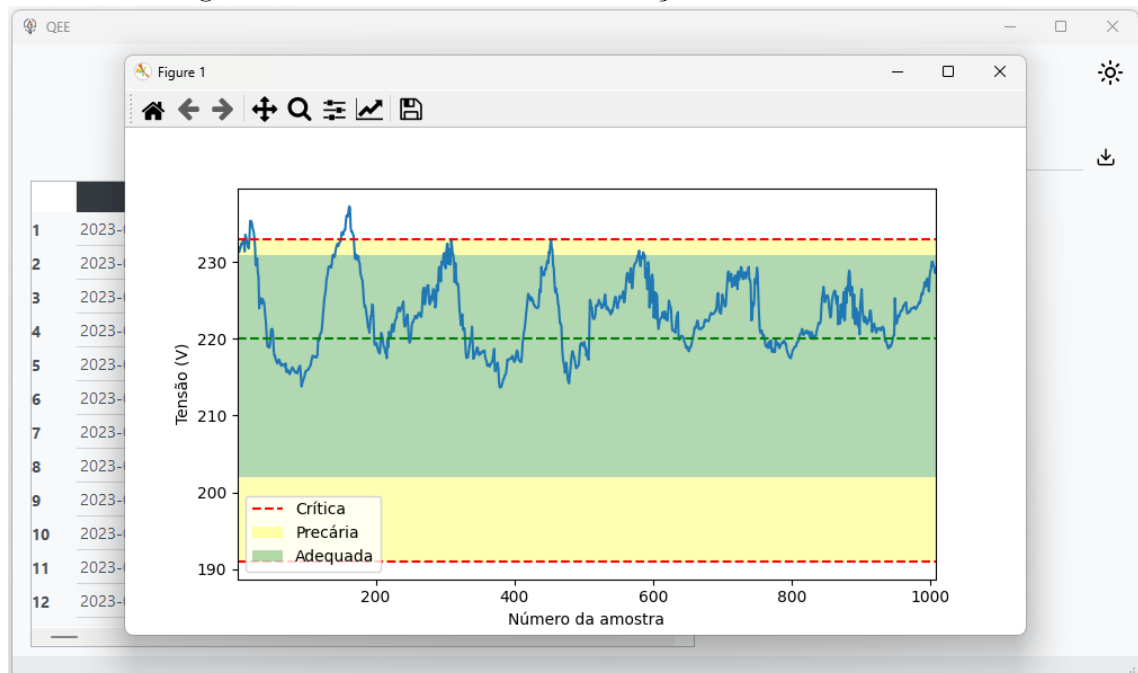
Figura 11 – Caixa de seleção de nível de tensão



Fonte: Autoria própria.

A Figura 12 mostra uma janela com o gráfico gerado ao selecionar o nível de tensão. Onde, as demarcações para tensão adequada, precária e crítica, correspondem as cores da Figura 1. Nessa janela também é possível editar e salvar o gráfico.

Figura 12 – Gráfico com a classificação dos níveis de tensão

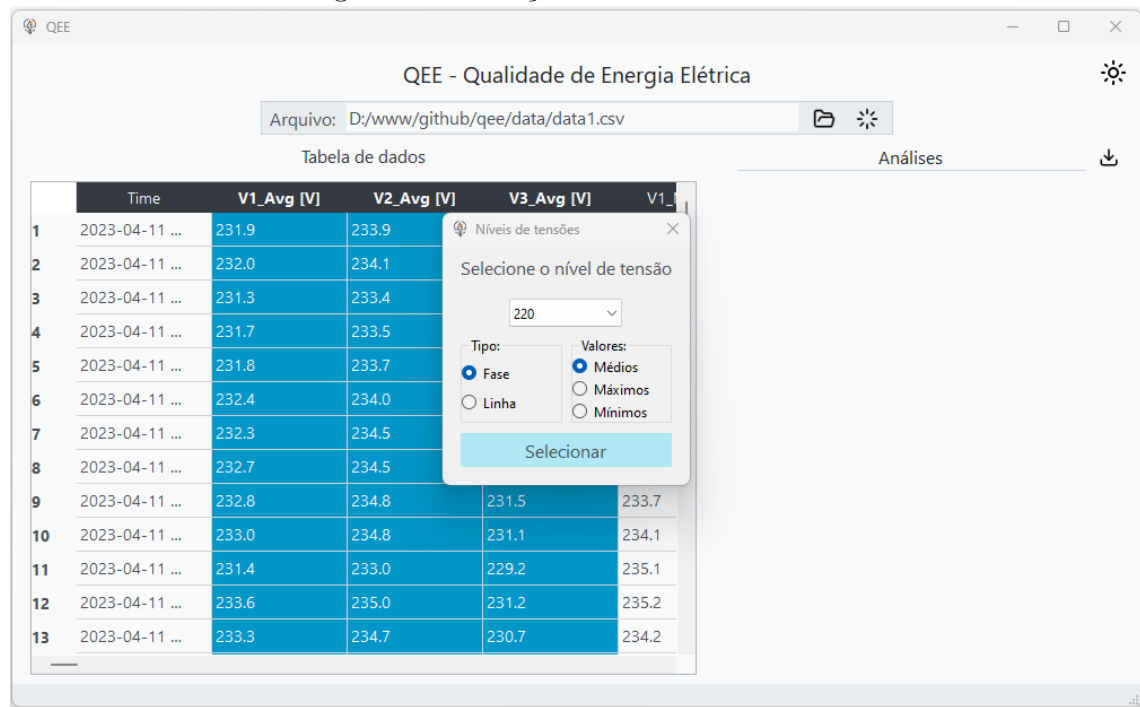


Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Variação de tensão

Para uma análise dos valores de tensões demonstrado na Figura 12, o PRODIST determina os indicadores de variação de tensão DRP e DRC. Partindo disso, a próxima função da interface é a “Variação de tensão”, em que o usuário precisa selecionar os 3 níveis de tensão, seja tensões de fase ou tensões de linha, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Seleção dos níveis de tensão



Fonte: Autoria própria.

Na barra “Análises”, a direita da interface na Figura 14, aparece uma lista com as análises que já foram feitas. No qual possui as funções de remover e salvar um resultado específico, ou salvar toda a análise.

Figura 14 – Resultado do cálculo dos indicadores de variação de tensão

The screenshot shows the QEE software interface. The main window is titled "QEE - Qualidade de Energia Elétrica". Below the title bar, there is a file path: "Arquivo: D:/www/github/qee/data/data1.csv". The interface is divided into two main sections: "Tabela de dados" (Data Table) and "Análises" (Analysis).

Tabela de dados:

	Time	V1_Avg [V]	V2_Avg [V]	V3_Avg [V]	V1_...
1	2023-04-11 ...	231.9	233.9	230.5	232.4
2	2023-04-11 ...	232.0	234.1	230.5	232.5
3	2023-04-11 ...	231.3	233.4	229.9	232.2
4	2023-04-11 ...	231.7	233.5	230.0	232.5
5	2023-04-11 ...	231.8	233.7	230.7	232.3
6	2023-04-11 ...	232.4	234.0	230.7	233.2
7	2023-04-11 ...	232.3	234.5	231.1	232.9
8	2023-04-11 ...	232.7	234.5	231.1	233.6
9	2023-04-11 ...	232.8	234.8	231.5	233.7
10	2023-04-11 ...	233.0	234.8	231.1	234.1
11	2023-04-11 ...	231.4	233.0	229.2	235.1
12	2023-04-11 ...	233.6	235.0	231.2	235.2
13	2023-04-11 ...	233.3	234.7	230.7	234.2

Análises:

Variação de tensão (Fase) - valores Médios

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V2_Avg [V]	5.06%	3.00%
DRC	V2_Avg [V]	5.95%	0.50%

Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Fator de potência

A função “Fator de potência” analisa o fator de potência, classificando em situação crítica quando abaixo de 0,92 e adequado para maior ou igual, como mostra Figura 15.

Figura 15 – Análise do fator de potência

The screenshot shows the QEE software interface. The main window is titled "QEE - Qualidade de Energia Elétrica". Below the title bar, there is a file path: "Arquivo: D:/www/github/qee/data/data1.csv". The interface is divided into two main sections: "Tabela de dados" (Data Table) and "Análises" (Analysis).

Tabela de dados:

	har20V3_Avg [V]	dpfti_Avg	dpfti_Max	dpfti_Min	Pst
1	-0.204	0.991	1.0	0.954	0.343
2	-0.203	0.991	1.0	0.956	0.257
3	-0.2	0.991	1.0	0.962	0.327
4	-0.194	0.988	1.0	0.945	0.317
5	-0.208	0.987	1.0	0.944	0.294
6	-0.203	0.985	1.0	0.924	0.353
7	-0.205	0.987	1.0	0.95	0.199
8	-0.197	0.987	1.0	0.939	0.317
9	-0.196	0.986	1.0	0.93	0.318
10	-0.191	0.986	1.0	0.945	0.235
11	-0.121	0.983	1.0	0.948	0.197
12	-0.17	0.981	0.987	0.94	0.319
13	-0.202	0.981	0.989	0.94	0.255

Análises:

Fator de potência

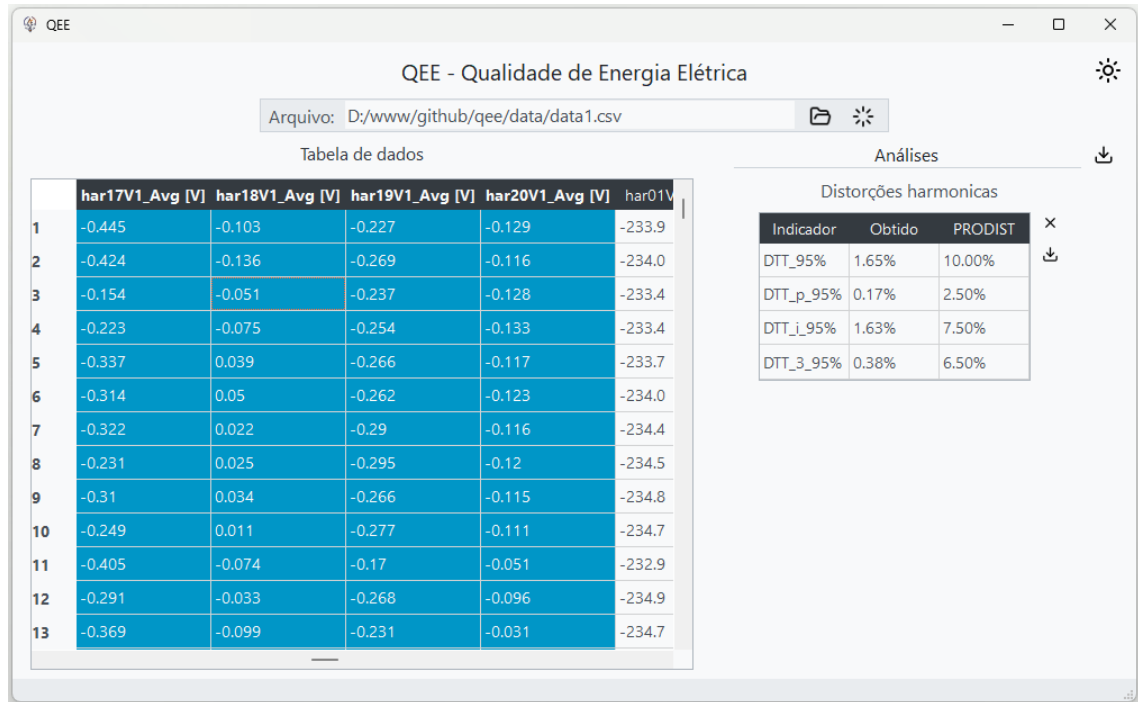
Classificação	Quantidade
Adequado	1007
Crítico	1

Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Distorções harmônicas

Já a função “Distorções harmônicas” calcula os indicadores de distorções harmônicas, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Cálculo dos indicadores de distorções harmônicas



Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Desequilíbrio de tensão

Para função de desequilíbrio de tensão é necessário selecionar as 3 tensões de linha. Sendo assim o *software* calcula o indicador, como mostra a Figura 17

Figura 17 – Cálculo do indicador de desequilíbrio de tensão

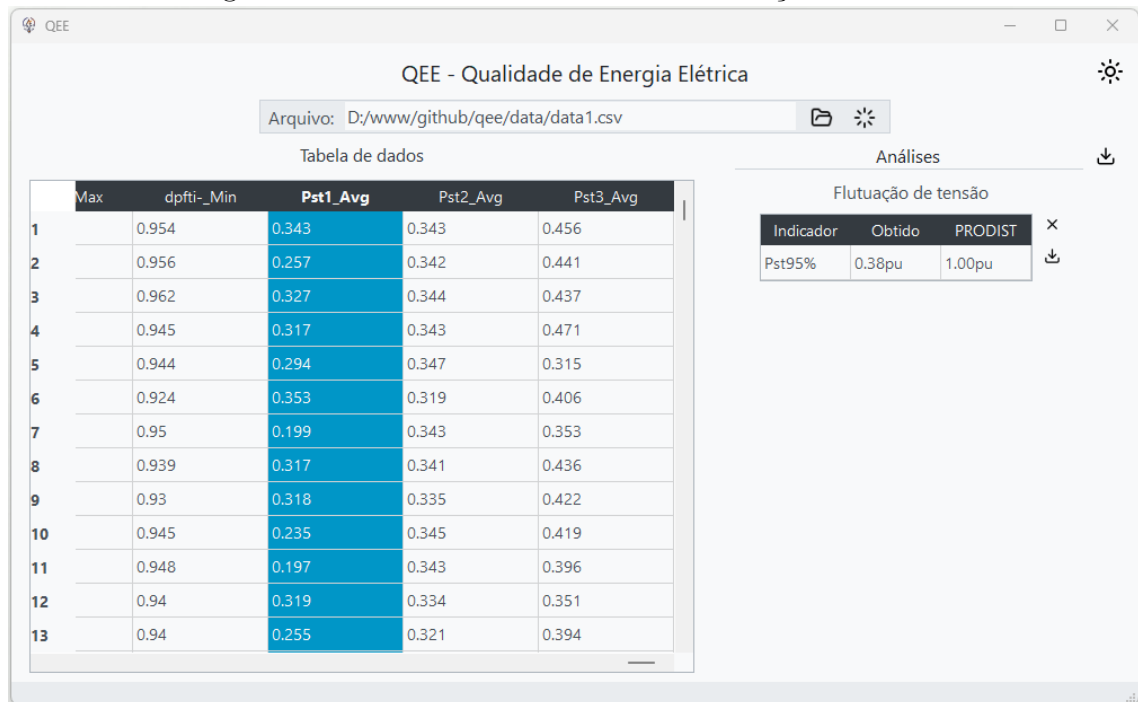


Fonte: Autoria própria.

4.2.6 Flutuação de tensão

A função "Flutuação de tensão" determina o indicador $Pst95\%$, Figura 18.

Figura 18 – Cálculo do indicador de flutuação de tensão

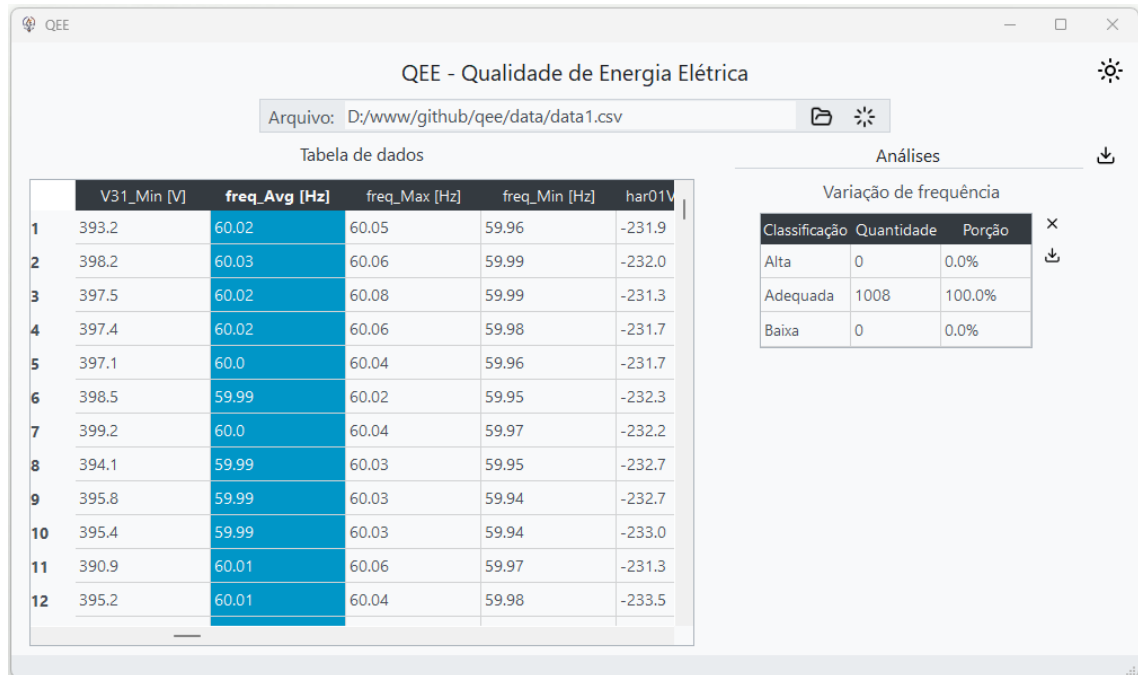


Fonte: Autoria própria.

4.2.7 Variação de frequência

“Variação de frequência” é a última função da interface. Na qual expressa a classificação da frequência em alta, adequada e baixa (Figura 19).

Figura 19 – Análise da variação de frequência



Fonte: Autoria própria.

4.3 ANÁLISE DOS DADOS

4.3.1 Variação de tensão

Nessa etapa foram efetuadas análises para as tensões de fase e linha. Em que, foram determinados os indicadores DRP e DRC para as duas amostras injetadas no *software*.

Os indicadores para tensão de fase foram dispostos na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 – Indicadores de variação de tensão de fase para amostra 1

Indicador	Médios (%)	Máximos (%)	Mínimos (%)	PRODIST (%)
<i>DRP</i>	5,06	7,74	3,57	3,00%
<i>DRC</i>	5,95	10,12	1,88	0,50%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Indicadores de variação de tensão de fase para amostra 2

Indicador	Médios (%)	Máximos (%)	Mínimos (%)	PRODIST (%)
<i>DRP</i>	0,20	1,98	0,30	3,00%
<i>DRC</i>	0,20	0,60	0,20	0,50%

Fonte: Autoria própria.

Analisando essas duas amostras pode se notar que apenas a amostra 2 (Tabela 8) conseguiu ficar dentro dos limites determinados pelo PRODIST.

De maneira análoga as tensões de fase, foram determinados os indicadores para tensões de linha conforme Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9 – Indicadores de variação de tensão de linha para amostra 1

Indicador	Médios (%)	Máximos (%)	Mínimos (%)	PRODIST (%)
<i>DRP</i>	10,42	8,93	4,66	3,00%
<i>DRC</i>	11,01	6,35	3,08	0,50%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Indicadores de variação de tensão de linha para amostra 2

Indicador	Médios (%)	Máximos (%)	Mínimos (%)	PRODIST (%)
<i>DRP</i>	0,69	2,78	0,40	3,00%
<i>DRC</i>	0,20	0,60	0,20	0,50%

Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Fator de potência

Para o fator de potência foi determinado a classificação conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Classificação do fator de potência para amostra 1

Classificação	Médios	Máximos	Mínimos
Adequado	1007	1007	911
Crítico	1	1	97

Fonte: Autoria própria.

Os valores médios, máximos e mínimos dispostos na Tabela 11, representam a quantidade de leituras para esses valores que ficaram dentro do intervalo determinado pelo PRODIST (Adequado) e fora (Crítico).

4.3.3 Distorções harmônicas

Os indicadores de distorções harmônicas encontrados para amostra 1 foram disposto na Tabela 12, onde V1, V2 e V3 são as tensões referentes aos harmônicos.

Tabela 12 – Indicadores de distorções harmônicas para amostra 1

Indicador	V1 (%)	V2 (%)	V3 (%)	PRODIST (%)
<i>DTT_{95%}</i>	1,65	1,83	1,80	10.00
<i>DTT_{p95%}</i>	0,17	0,19	0,18	2.50
<i>DTT_{i95%}</i>	1,63	1,80	1,70	7.50
<i>DTT_{395%}</i>	0,38	0,52	0,71	6.50

Fonte: Autoria própria.

Para amostra 2 os indicadores estão presentes na Tabela 13.

Tabela 13 – Indicadores de distorções harmônicas para amostra 2

Indicador	V1 (%)	V2 (%)	V3 (%)	PRODIST (%)
$DTT_{95\%}$	1,85	2,08	39,70	10.00
$DTT_p95\%$	0,04	0,03	0,51	2.50
$DTT_i95\%$	1,84	2,03	34,79	7.50
$DTT_395\%$	0,53	0,64	20,14	6.50

Fonte: Autoria própria.

4.3.4 Desequilíbrio de tensão

A Tabela 14 contém os fatores de desequilíbrio de tensão calculados para os valores médios, máximos e mínimos das tensões de linha da amostra 1.

Tabela 14 – Fatores de desequilíbrio de tensão para amostra 1

Indicador	Médios (%)	Máximos (%)	Mínimos (%)	PRODIST (%)
$FD95\%$	1,37	1,35	1,41	3.00

Fonte: Autoria própria.

Para amostra 2 os indicadores podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15 – Fatores de desequilíbrio de tensão para amostra 2

Indicador	Médios (%)	Máximos (%)	Mínimos (%)	PRODIST (%)
$FD95\%$	1,11	1,11	1,15	3.00

Fonte: Autoria própria.

4.3.5 Flutuação de tensão

Para esse indicador, foram encontrados valores para as 3 tensões, como mostra a Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 16 – Indicadores de flutuação de tensão para amostra 1

Indicador	V1 (pu)	V2 (pu)	V3 (pu)	PRODIST (pu)
$P_{st}95\%$	0,38	0,84	0,43	1.00

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 – Indicadores de flutuação de tensão para amostra 2

Indicador	V1 (pu)	V2 (pu)	V3 (pu)	PRODIST (pu)
$P_{st}95\%$	0,26	0,28	0,30	1.00

Fonte: Autoria própria.

4.3.6 Variação de frequência

A amostra 1 obteve as seguintes classificações, Tabela 18, em que os valores médios, máximos e mínimos, correspondem as porções percentuais do total de amostras para cada classificação.

Tabela 18 – Classificação da variação de frequência para amostra 1

Classificação	Médios (%)	Máximos (%)	Mínimos (%)
Alta	0,00	0,60	0,00
Adequada	100,00	99,40	99,70
Baixa	0,00	0,00	0,30

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 19 contém a classificação da variação de tensão para amostra 2.

Tabela 19 – Classificação da variação de frequência para amostra 2

Classificação	Médios (%)	Máximos (%)	Mínimos (%)
Alta	0,00	0,99	0,00
Adequada	100,00	99,01	99,01
Baixa	0,00	0,00	0,99

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

No decorrer desse trabalho foi desenvolvida uma rotina em Python contendo uma interface gráfica, com o intuito de caracterizar a qualidade de energia elétrica de uma unidade consumidora seguindo os procedimentos adotados pela ANEEL para tal.

Os resultados obtidos mostraram que a rotina desenvolvida conseguiu calcular os indicadores de qualidade de energia e gerar o relatório. Conseguindo mostrar também que a interface gráfica implementada facilitou muito a visualização das análises.

Esse trabalho conseguiu ser de grande importância para facilitar as análises de qualidade de energia. Sendo assim, a proposta desejada foi alcançada e esse trabalho conseguiu realizar o seu objetivo.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8**. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf>.
- BISONG, E. **Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform: A Comprehensive Guide for Beginners**. [S.l.]: Apress, 2019.
- BOLLEN, M. H. What is power quality? **Electric Power Systems Research**, v. 66, n. 1, p. 5–14, 2003.
- BORGES, L. E. **Python para desenvolvedores: aborda Python 3.3**. [S.l.]: Novatec Editora, 2014.
- DUGAN, R. C. **Electrical power system quality**. 2nd ed.. ed. [S.l.]: The McGraw Hill Companies,, 2004.
- FITZPATRICK, M. **Create GUI Applications with Python & Qt6 (PySide6 Edition): The hands-on guide to making apps with Python**. 5th. ed. [S.l.]: Amazon.com, 2022.
- FUCHS, E. F.; MASOUM, M. A. S. **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines**. 2nd ed.. ed. [S.l.]: Elsevier, 2015.
- GLOVER, J. D.; OVERBYE, T. J.; SARMA, M. S. **Power System Analysis & Design**. 6 ed.. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2017.
- LTDA, M. do B. **ET-5051C/ET5061C**. São Paulo, 2019.
- MCKINNEY, W. **Python for Data Analysis**. 3rd. ed. [S.l.]: O'Reilly Media, Inc., 2022.
- NELLI, F. **Python Data Analytics with Pandas, NumPy, and Matplotlib**. Third. [S.l.]: Apress, 2023.
- OLIPHANT, T. E. et al. **Guide to NumPy**. USA: Trelgol Publishing, 2006.
- PAULILO, G. Capítulo iii desequilíbrios de tensão. **O Setor Elétrico**, v. 86, p. 42–48, 2013.
- REZENDE, P. H. O.; SAMESIMA, M. I. Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico. **Horizonte Científico**, v. 6, n. 2, 2012.