



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 DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA
UNIDADE CONSUMIDORA**

CARAÚBAS - RN
2023

SEBASTIÃO NAZÁRIO DE AZEVEDO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA EM PYTHON PARA
CARACTERIZAÇÃO DA 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:

Prof. Dra. Érica Manguiera Lima

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A914d Azevedo, Sebastião Nazário de.
Desenvolvimento de uma Rotina em Python para
Caracterização da Qualidade de Energia Elétrica de
uma Unidade Consumidora / Sebastião Nazário de
Azevedo. - 2023.
76 f. : il.

Orientadora: Érica Manguiera Lima.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de --Selecione um
Curso ou Programa--, 2023.

1. Qualidade de Energia Elétrica. 2. Python.
3. Interface Gráfica. 4. Automatização. I. Lima,
Érica Manguiera, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

SEBASTIÃO NAZÁRIO DE AZEVEDO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA EM PYTHON PARA
CARACTERIZAÇÃO DA 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:

Prof. Dra. Érica Manguiera Lima
Presidente

Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Coelho
Membro

Prof. Dra. Sâmara de Cavalcante Paiva
Membro

Dedico esse trabalho aos meus pais, Elvina e Pedro, meus pilares de amor e apoio.

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer primeiramente a Deus, em seguida gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização desse trabalho, em especial aos meus pais, Elvina e Pedro e aos meus irmãos e amigos, por sempre me incentivaram a continuar em frente.

Gostaria de agradecer a UFERSA por me proporcionar a oportunidade de apreender a crescer academicamente. Também gostaria de deixar meu sincero agradecimento a minha orientadora Érica Manguiera Lima pelas orientações e ajuda durante a construção desse trabalho.

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

James Clerk Maxwell

RESUMO

A presença de cargas elétricas 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 estabelece 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, e 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 comprovam a funcionalidade da rotina, elaborando um relatório acerca da qualidade de energia da unidade consumidora.

Palavras-chave: Qualidade de Energia Elétrica. Python. Interface Gráfica. Automação.

ABSTRACT

The presence of increasingly sensitive electrical and electronic loads in the current electrical network, makes it essential to provide quality in the power supply, without interruptions or large variations in voltage values. Therefore, the National Electric Energy Agency establishes regulatory procedures for distribution networks called Electricity Distribution Procedures in the National Electric System (PRODIST), which enable the operation and maintenance of these systems. In particular, module 8 of PRODIST is dedicated to verifying the Power Quality (PQ), establishing limits and indicators ensure the quality of the energy supply and its safety for the consumer and the concessionaire. The study of PQ is usually carried out using network analyzers associated with software, which is generally not very intuitive, increasing the possibility of human error in the analysis of indicators. In this context, this work proposes the development of a routine in the Python programming language with a graphical interface, which generates a power quality report for a consumer unit, automating the process and reducing the possibility of errors in data interpretation. The software was developed based on PRODIST and tested using real data. The tests carried out proved the functionality of the routine, thus providing a power quality report for a consumer unit.

Key words: Power quality. Python. Graphical interface. Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Faixas de tensão em relação à de referência	18
Figura 2 – Estrutura básica de um módulo Python	25
Figura 3 – Diagrama de classes UML para a rotina Python	27
Figura 4 – <i>Layout</i> da interface gráfica	29
Figura 5 – Analisador de qualidade de energia elétrica MINIPA modelo ET-5061C	30
Figura 6 – Tela inicial da interface gráfica	36
Figura 7 – Barra de seleção de arquivo	36
Figura 8 – Mensagens informativas	37
Figura 9 – Tabela de dados com os valores importados da planilha	37
Figura 10 – Menu suspenso com as funções do <i>software</i>	38
Figura 11 – Caixa de seleção de nível de tensão	39
Figura 12 – Gráfico com a classificação dos níveis de tensão	39
Figura 13 – Seleção dos níveis de tensão	40
Figura 14 – Resultado do cálculo dos indicadores de variação de tensão	41
Figura 15 – Análise do fator de potência	41
Figura 16 – Cálculo dos indicadores de distorções harmônicas	42
Figura 17 – Cálculo do indicador de desequilíbrio de tensão	43
Figura 18 – Cálculo do indicador de flutuação de tensão	43
Figura 19 – Análise da variação de frequência	44
Figura 20 – Gráfico para tensão V1 de fase média	52
Figura 21 – Gráfico para tensão V2 de fase média	52
Figura 22 – Gráfico para tensão V3 de fase média	53
Figura 23 – Gráfico para tensão V1 de fase máxima	53
Figura 24 – Gráfico para tensão V2 de fase máxima	54
Figura 25 – Gráfico para tensão V3 de fase máxima	54
Figura 26 – Gráfico para tensão V1 de fase mínima	55
Figura 27 – Gráfico para tensão V2 de fase mínima	55
Figura 28 – Gráfico para tensão V3 de fase mínima	56
Figura 29 – Gráfico para tensão V12 de linha média	56
Figura 30 – Gráfico para tensão V23 de linha média	57
Figura 31 – Gráfico para tensão V31 de linha média	57
Figura 32 – Gráfico para tensão V12 de linha máxima	58
Figura 33 – Gráfico para tensão V23 de linha máxima	58
Figura 34 – Gráfico para tensão V31 de linha máxima	59
Figura 35 – Gráfico para tensão V12 de linha mínima	59
Figura 36 – Gráfico para tensão V23 de linha mínima	60

Figura 37 – Gráfico para tensão V31 de linha mínima	60
Figura 38 – Gráfico para tensão V1 de fase média	61
Figura 39 – Gráfico para tensão V2 de fase média	61
Figura 40 – Gráfico para tensão V3 de fase média	62
Figura 41 – Gráfico para tensão V1 de fase máxima	62
Figura 42 – Gráfico para tensão V2 de fase máxima	63
Figura 43 – Gráfico para tensão V3 de fase máxima	63
Figura 44 – Gráfico para tensão V1 de fase mínima	64
Figura 45 – Gráfico para tensão V2 de fase mínima	64
Figura 46 – Gráfico para tensão V3 de fase mínima	65
Figura 47 – Gráfico para tensão V12 de linha média	65
Figura 48 – Gráfico para tensão V23 de linha média	66
Figura 49 – Gráfico para tensão V31 de linha média	66
Figura 50 – Gráfico para tensão V12 de linha máxima	67
Figura 51 – Gráfico para tensão V23 de linha máxima	67
Figura 52 – Gráfico para tensão V31 de linha máxima	68
Figura 53 – Gráfico para tensão V12 de linha mínima	68
Figura 54 – Gráfico para tensão V23 de linha mínima	69
Figura 55 – Gráfico para tensão V31 de linha mínima	69

LISTA DE CÓDIGOS

Código 1	Código que calcula os indicadores de variação de tensão	32
Código 2	Classe para verificação do fator de potência	32
Código 3	Função para cálculo dos indicadores de distorções harmônicas	33
Código 4	Função para cálculo do fator de desequilíbrio de tensão	34
Código 5	Função para cálculo do indicador de flutuação de tensão	34
Código 6	Função para análise da variação de frequência	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal 127 V	19
Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal 220 V	19
Tabela 3 – Pontos de conexão em Tensão Nominal 380 V	19
Tabela 4 – Limites das distorções harmônicas totais de tensão	22
Tabela 5 – Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão	23
Tabela 6 – Limites para o indicador de flutuação de tensão	24
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	45
Tabela 10 – Indicadores de variação de tensão de linha para amostra 2	45
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	46
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	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	17
2.2	QUALIDADE DA ENERGIA SEGUNDO O PRODIST	17
2.2.1	Variações de tensão em regime permanente	18
2.2.2	Fator de potência	20
2.2.3	Harmônicos	20
2.2.4	Desequilíbrio de tensão	22
2.2.5	Flutuação de tensão	23
2.2.6	Variação de frequência	24
2.3	PYTHON	24
2.3.1	Análise e processamento de dados	25
2.3.2	NumPy	25
2.3.3	Pandas	25
2.3.4	Matplotlib	26
2.3.5	PySide6	26
3	METODOLOGIA	27
3.1	DESENVOLVIMENTO DA ROTINA EM PYTHON	27
3.1.1	Escolha da linguagem de programação	27
3.1.2	Arquitetura	27
3.1.3	Implementação das classes	28
3.1.4	Uso de bibliotecas específicas	28
3.2	INTERFACE GRÁFICA	28
3.2.1	Desenvolvimento	28
3.2.2	Funcionalidades	29
3.2.3	<i>Layout</i> prévio	29
3.3	COLETA DE DADOS	29
3.3.1	Analisador de qualidade	29
3.3.2	Fonte de dados	30
3.3.3	Processamento dos dados	30
3.4	ANÁLISE DE DADOS	30

3.4.1	Uso das classes implementadas	30
3.4.2	Interpretação dos resultados	31
4	DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i>	32
5	RESULTADOS	36
5.1	DEMONSTRAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA	36
5.1.1	Gerar gráfico	38
5.1.2	Variação de tensão	40
5.1.3	Fator de potência	41
5.1.4	Distorções harmônicas	42
5.1.5	Desequilíbrio de tensão	42
5.1.6	Flutuação de tensão	43
5.1.7	Variação de frequência	44
5.2	ANÁLISE DOS DADOS	44
5.2.1	Variação de tensão	44
5.2.2	Fator de potência	45
5.2.3	Distorções harmônicas	46
5.2.4	Desequilíbrio de tensão	46
5.2.5	Flutuação de tensão	47
5.2.6	Variação de frequência	47
6	CONCLUSÃO	49
	Referências	50
	Apêndices	51
APÊNDICE A	GRÁFICOS DAS TENSÕES COM CLASSIFICAÇÃO - AMOSTRA 1	52
APÊNDICE B	GRÁFICOS DAS TENSÕES COM CLASSIFICAÇÃO - AMOSTRA 2	61
APÊNDICE C	RELATÓRIO DE ANÁLISE DE QEE GERADO PELA ROTINA COMPUTACIONAL - AMOSTRA 1	70
APÊNDICE D	RELATÓRIO DE ANÁLISE DE QEE GERADO PELA ROTINA COMPUTACIONAL - AMOSTRA 2	73

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 (QEE) 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 módulo 8 se dedica à manutenção da QEE.

O PRODIST visa avaliar a QEE, 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).

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 Módulo 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 da instalação investigada.

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,

é a automatização da comparação dos valores obtidos pelo analisador de qualidade de energia com os valores indicados pelo Módulo 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 Módulo 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 Módulo 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 QEE de uma unidade consumidora.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Compreender os conceitos, limites e indicadores para análise da QEE;
- entender o funcionamento do analisador de QEE;
- 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

A organização desse trabalho estabelece uma divisão em 5 capítulos. No segundo são apresentados os termos técnicos e a fundamentação teórica a respeito da QEE. A metodologia utilizada na elaboração desse trabalho é apresentada no terceiro capítulo e, no quarto, os resultados obtidos são demonstrados e analisados. Por último, no quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões acerca do projeto desenvolvido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

A definição de QEE 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 acarretam 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 QEE 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 módulo 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 Módulo 8, caso não possuam uma resolução específica, se aplicam ao Microssistema 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,

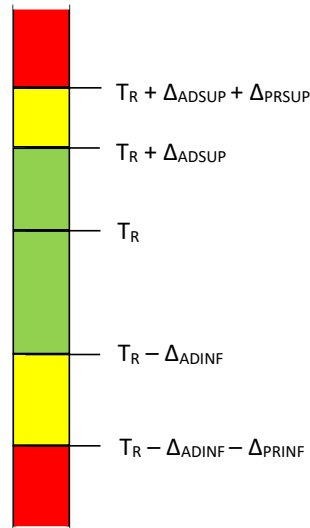
2021).

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;
- Δ = uma variação da tensão, em que as duas primeiras letras são abreviações para a classificação de tensão e as três últimas são abreviações para inferior e superior;
- 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 127 V

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 220 V

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 380 V

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 módulo 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 estejam com DRP e DRC superiores aos delimitados pelo PRODIST, a distribuidora deve compensar o titular da unidade consumidora conforme a Equação 3 (ANEEL, 2021),

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

em que (ANEEL, 2021):

- $k_1 = 0$ se $DRP \leq DRP_{limite}$ senão $k_1 = 3$;
- $k_2 = 0$ se $DRC \leq DRC_{limite}$ 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:

- 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),

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

em que, 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 de ordens diferentes: 180, 300, 360, 420 e 540 Hz, respectivamente.

As principais causas de harmônicos em sistemas são (Fuchs; Masoum, 2015):

- cargas não lineares, por exemplo: retificadores ou inversores;
- cargas 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 pode representar: componentes sub-harmônicas; componente fundamental; componentes inter-harmônicas; e componentes harmônicas (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 pode existir algum problema no sistema (Fuchs; Masoum, 2015).

Quando há presença de harmônicos triplos, ou seja, 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).

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),

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

na qual h corresponde as ordens harmônicas que variam de 2 até h_{max} (ordem harmônica de maior valor) (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),

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

sendo que, h representa as ordens harmônicas pares e não múltiplas de 3, com h_p sendo o maior valor da ordem harmônica (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),

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

em que, h simboliza as ordens harmônicas ímpares e não múltiplas de 3 partindo do 5, com h_i sendo o maior valor da ordem harmônica (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 (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	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	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

apresente 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 mau 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, sejam transformadores 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).

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

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 das fases ab, bc e ca, respectivamente (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	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
$FD95\%$	3,00%	2,00%

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021).

2.2.5 Flutuação de tensão

Quando ocorrem mudanças repentinas nos valores de pico ou eficazes da tensão, de forma sistemática ou aleatória, caracteriza-se esse fenômeno como flutuação de tensão.

Para o PRODIST, os indicadores de flutuação são o P_{st} e P_{lt} , que representam o quanto de cintilação luminosa estão relacionadas a flutuação de tensão para os períodos de 10 minutos e 2 horas, respectivamente (ANEEL, 2021).

$P_{st}95\%$ é o indicador utilizado para verificação do desempenho do sistema, que condiz com o percentil 95 dos valores calculados para P_{st} pela Equação 14 (ANEEL, 2021),

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

em que 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 (ANEEL, 2021).

Tabela 6 – Limites para o indicador de flutuação de tensão

Indicador	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$P_{st}95\%$	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

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).

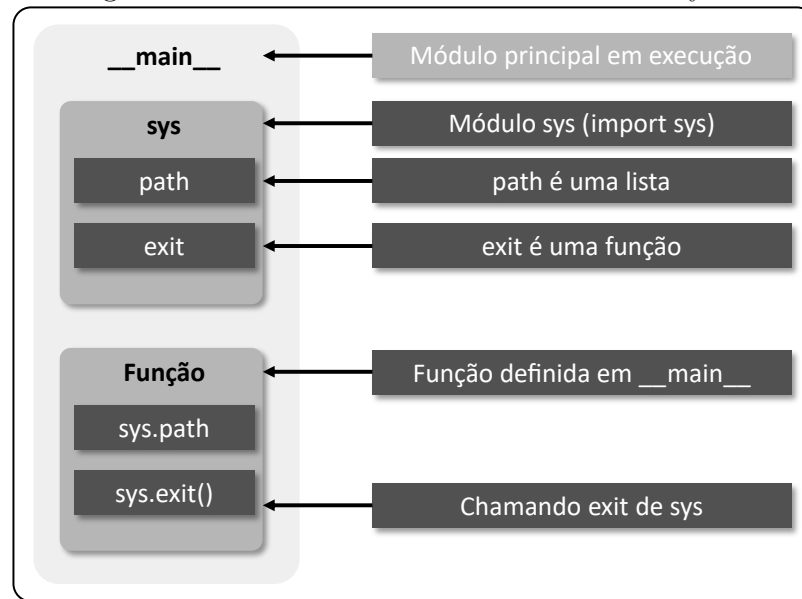
Para regime permanente e condições normais, o PRODIST determina que o sistema de distribuição deve operar em níveis de frequência entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (ANEEL, 2021).

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 (*numeric 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

No que concerne 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

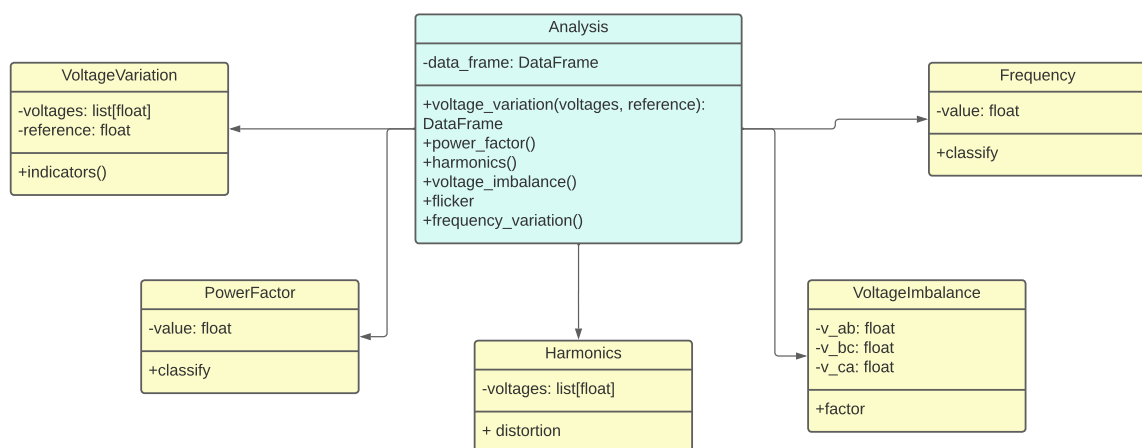
A linguagem Python foi escolhida por ser de fácil manuseio e possuir grandes variedades de bibliotecas voltadas a análise de dados e construção de interfaces.

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.

Na Figura 3 é mostrado 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

A maior classe (*Analysis*) é a principal, responsável pela conexão da rotina com a interface gráfica. As demais classes são, respectivamente: *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 do indicador de flutuação de tensão que é calculado dentro da classe principal, em que 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, captando 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

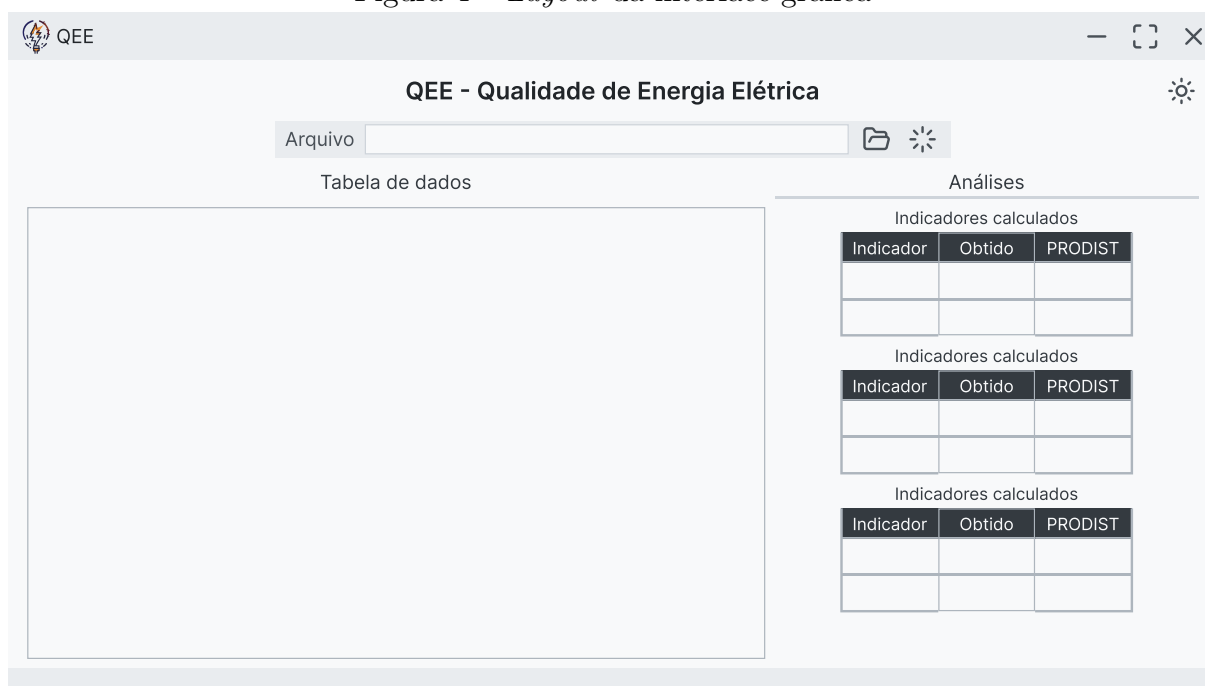
A interface gráfica permite que o usuário interaja com a rotina criada, importando uma planilha CSV ou XLS, para uma tabela e selecionando os parâmetros que deseja para calcular os indicadores.

A partir da interface, pode-se 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, na qual observa-se a presença de uma tabela para exibição dos dados importados da planilha, e uma barra na lateral direita, onde estão descritos 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, que 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* (Minipa, 2019). Na Figura 5 apresenta-se um exemplo desse modelo.

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



Fonte: Minipa (2019).

3.3.2 Fonte de dados

Os dados colhidos para análise da ferramenta, foram obtidos por meio do analisador de QEE Minipa ET-5061C instalado no bloco de professores I e na usina fotovoltaica desta universidade, em épocas diferentes. 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 DESENVOLVIMENTO DO *SOFTWARE*

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 e análise do fator de potência foi desenvolvida a classe do Código 2. Ela classifica o fator de potência em crítico e adequado a depender dos 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.

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

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.

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.

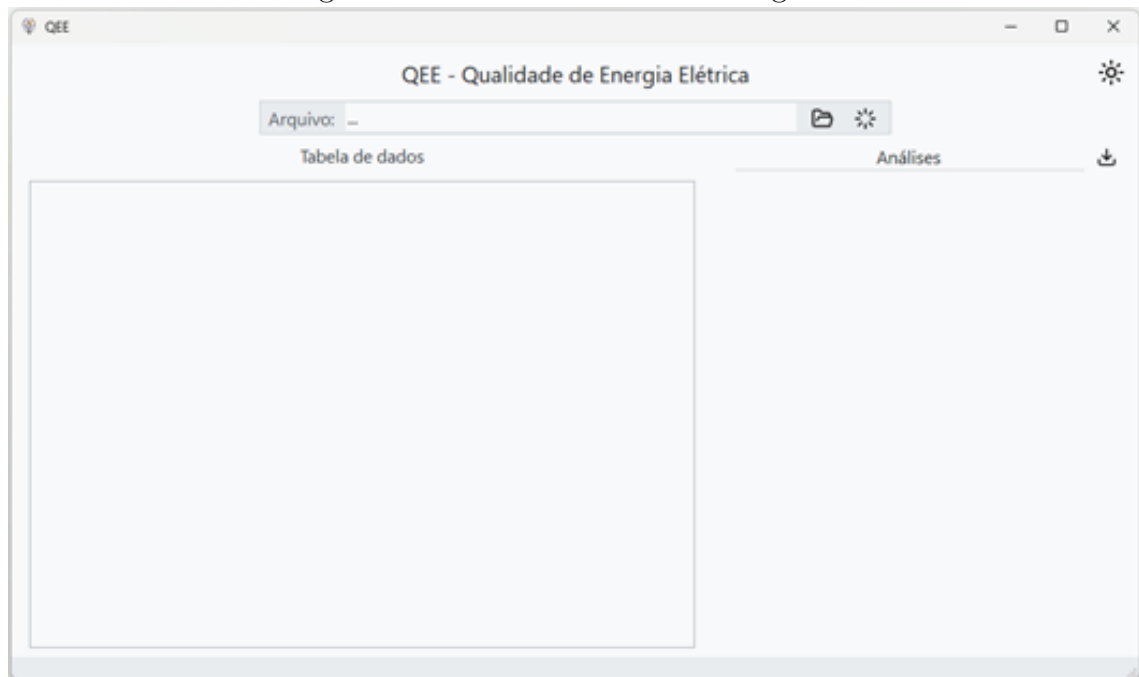
5 RESULTADOS

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

5.1 DEMONSTRAÇÃO DA INTERFACE GRÁFICA

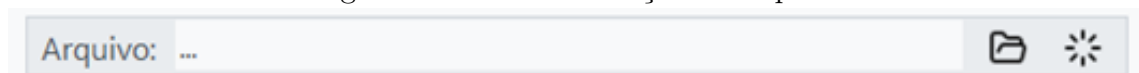
A Figura 6 demonstra a visão geral da interface gráfica desenvolvida. Observa-se uma barra de seleção de arquivo, destacada na Figura 7, e utilizada para digitar o caminho referente a planilha de dados, um botão para abrir o gerenciador de arquivos do sistema operacional e um botão para carregar o arquivo quando selecionado.

Figura 6 – Tela inicial da interface gráfica



Fonte: Autoria própria.

Figura 7 – Barra de seleção de arquivo

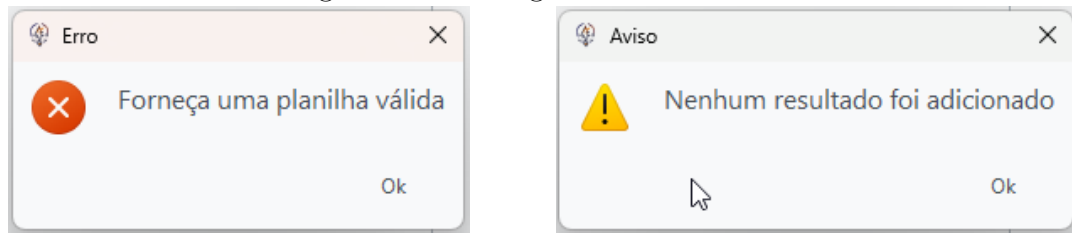


Fonte: Autoria própria.

A interface contém mensagens informativas, para situações de inconsistência em valores fornecidos e confirmações de ações realizadas, como pode ser observado na Figura 8.

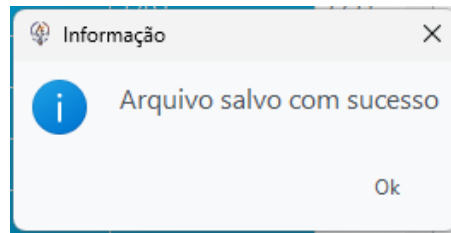
A Figura 8(a) mostra o exemplo para as mensagens de erros, enquanto Figura 8(b) para mensagem de aviso e Figura 8(c) para mensagens de informações.

Figura 8 – Mensagens informativas



(a) Mensagem de erro

(b) Mensagem de aviso



(c) Mensagem de informação

Fonte: Autoria própria.

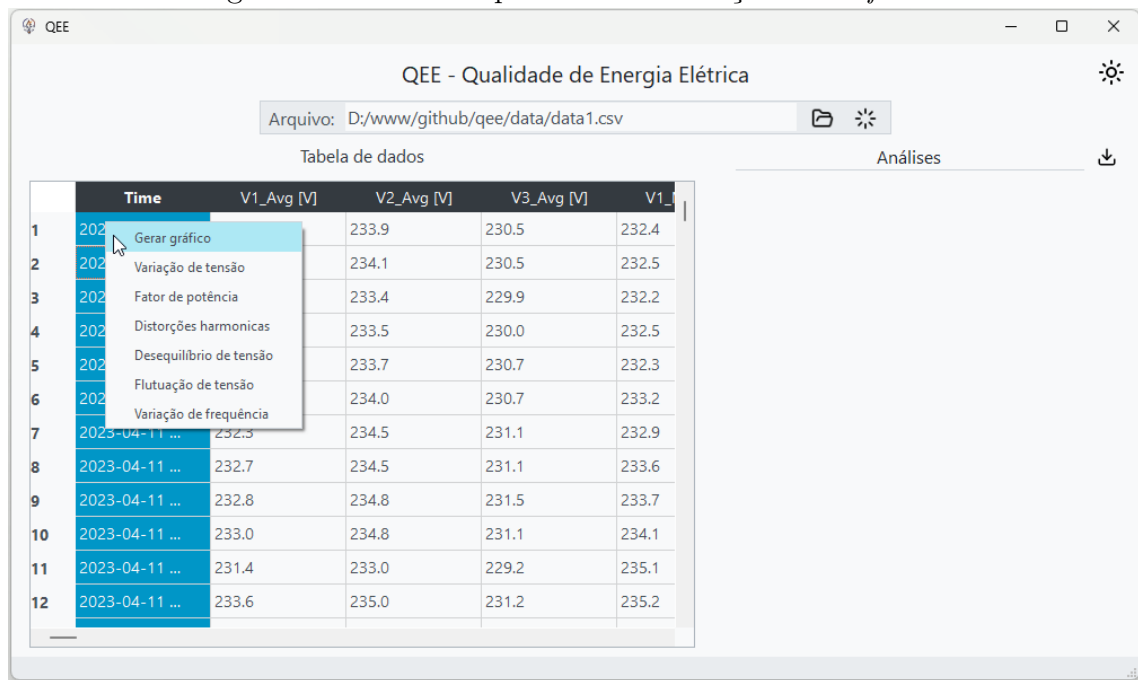
Quando for selecionada uma planilha adequada, aceita pela interface, os respectivos dados aparecem na tabela de dados, como mostrado na Figura 9.

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

	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

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.

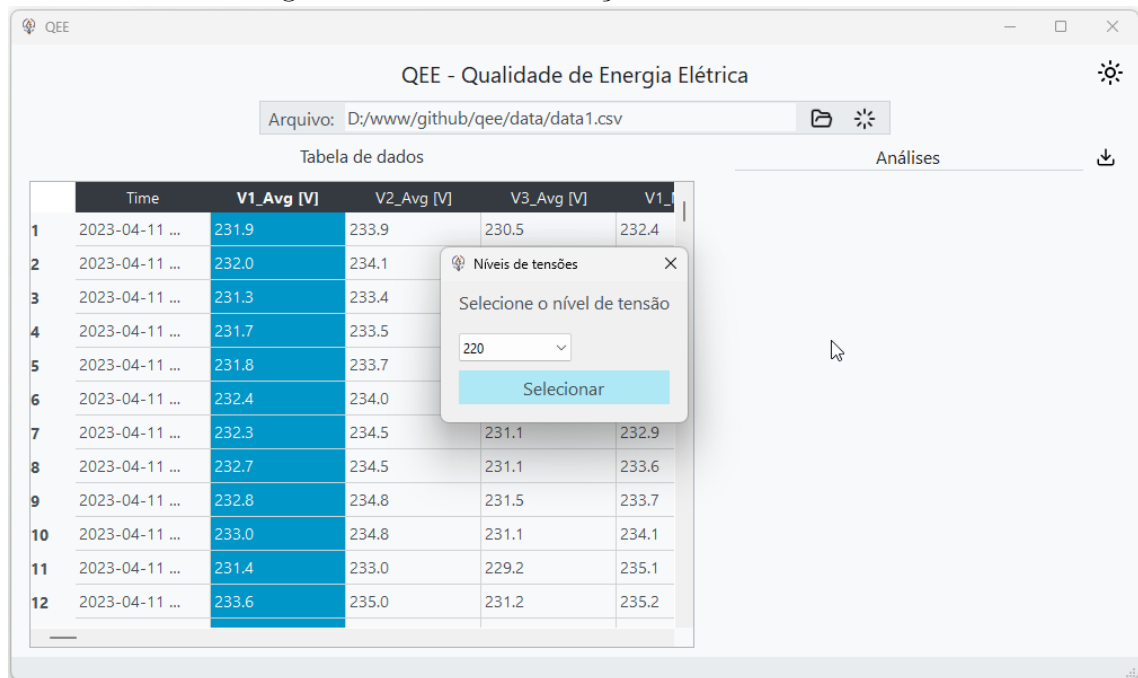
Figura 10 – Menu suspenso com as funções do *software*

Fonte: Autoria própria.

5.1.1 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.

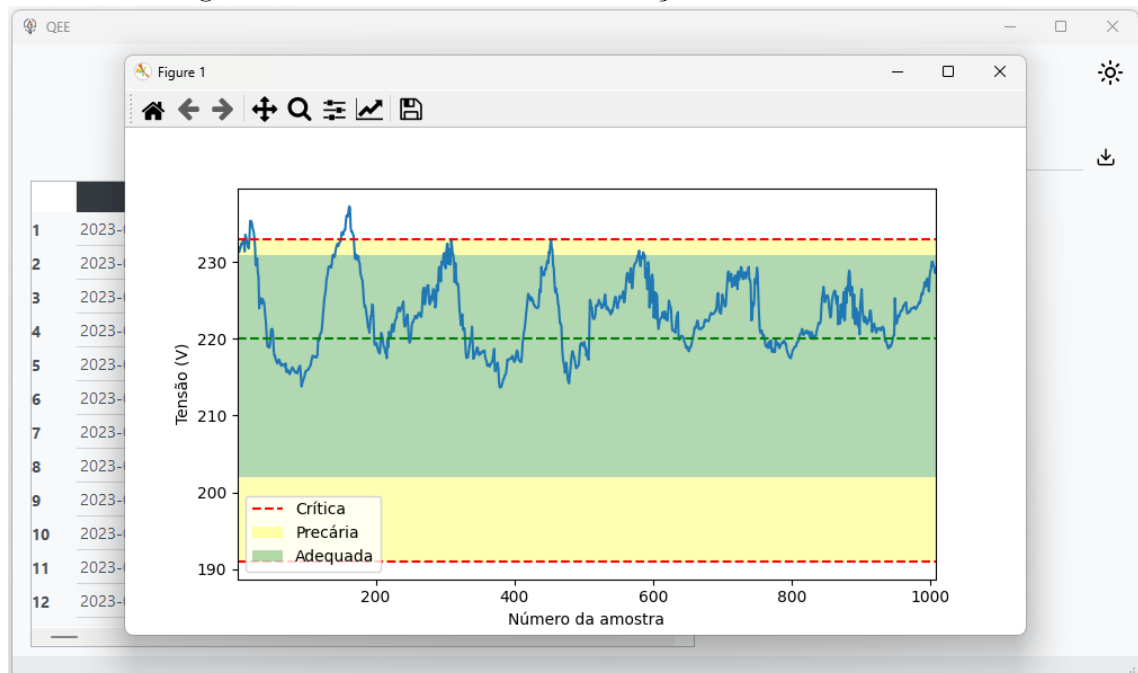
Figura 11 – Caixa de seleção de nível de tensão



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 12 é mostrada uma janela com o gráfico gerado ao selecionar o nível de tensão, no qual 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.

5.1.2 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 função seguinte 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 mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Seleção dos níveis de tensão



Fonte: Autoria própria.

Na barra “Análises”, à direita da interface na Figura 14, aparece uma lista com as análises que já foram feitas, possuindo, além disso, 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". It has 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.

5.1.3 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". It has 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

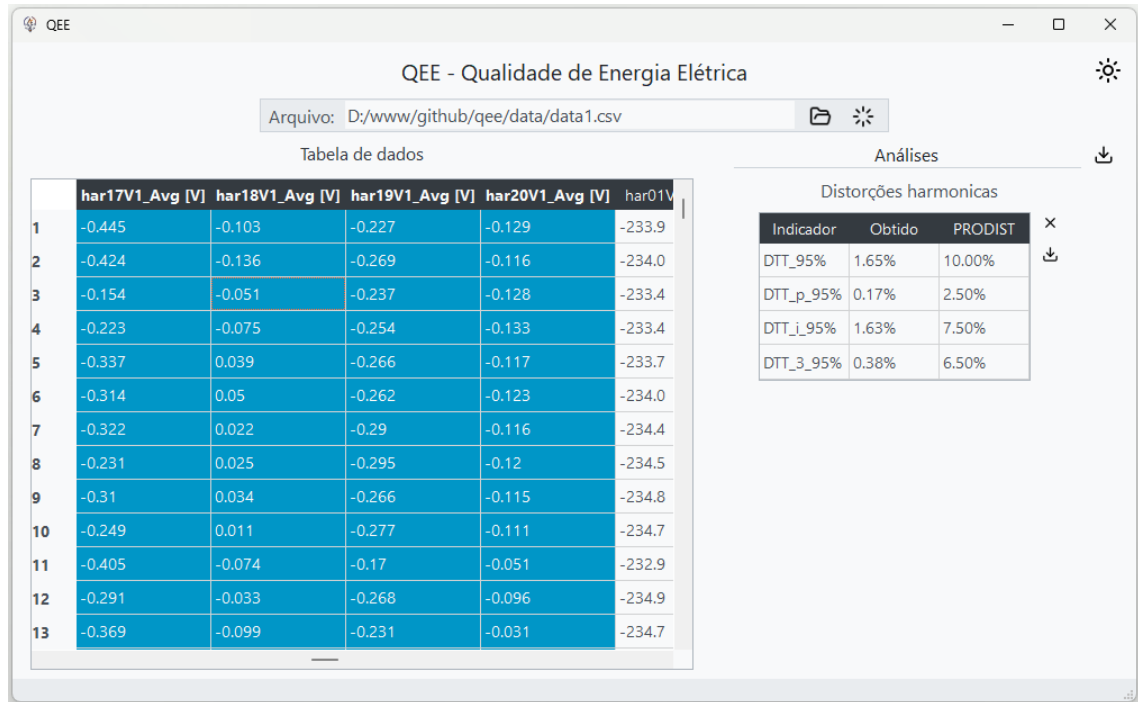
Classificação	Quantidade
Adequado	1007
Crítico	1

Fonte: Autoria própria.

5.1.4 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

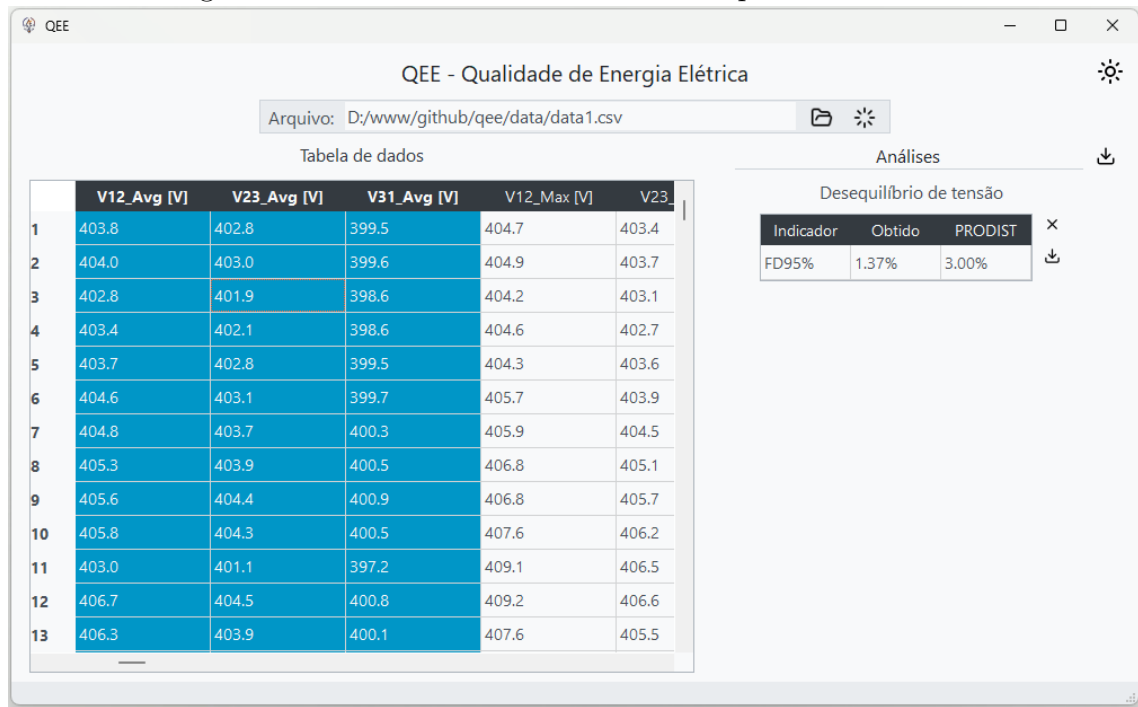


Fonte: Autoria própria.

5.1.5 Desequilíbrio de tensão

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

Figura 17 – Cálculo do indicador de desequilíbrio de tensão

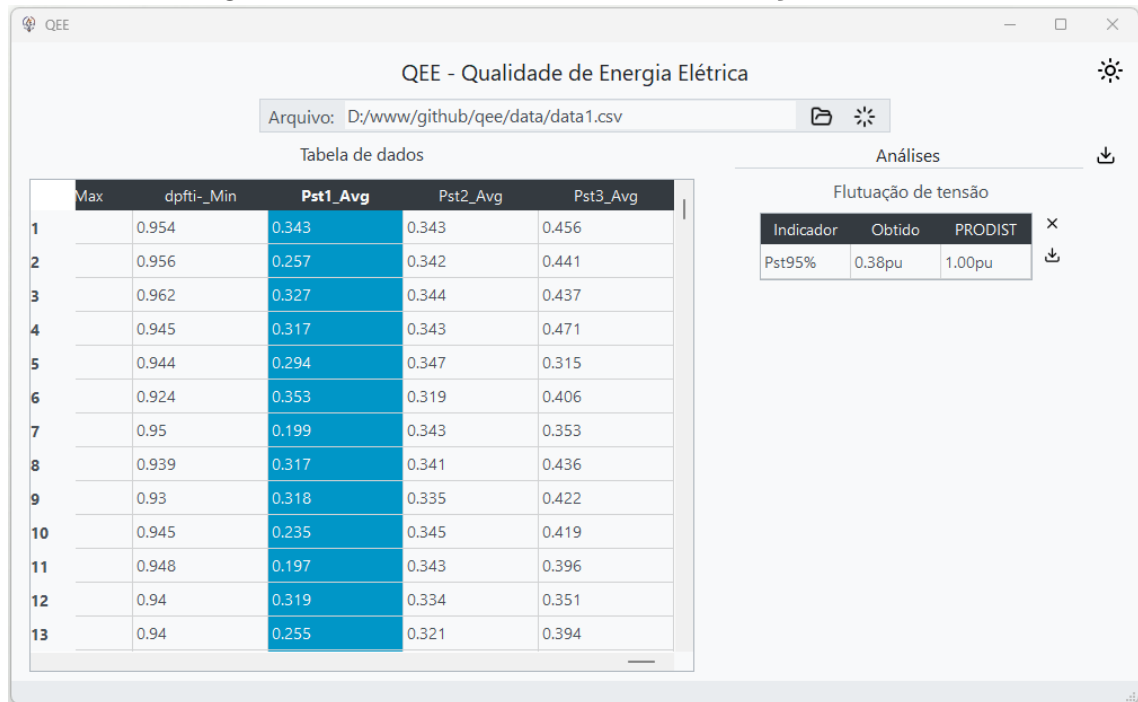


Fonte: Autoria própria.

5.1.6 Flutuação de tensão

A função “Flutuação de tensão” determina o indicador $P_{st}95\%$, Figura 18.

Figura 18 – Cálculo do indicador de flutuação de tensão

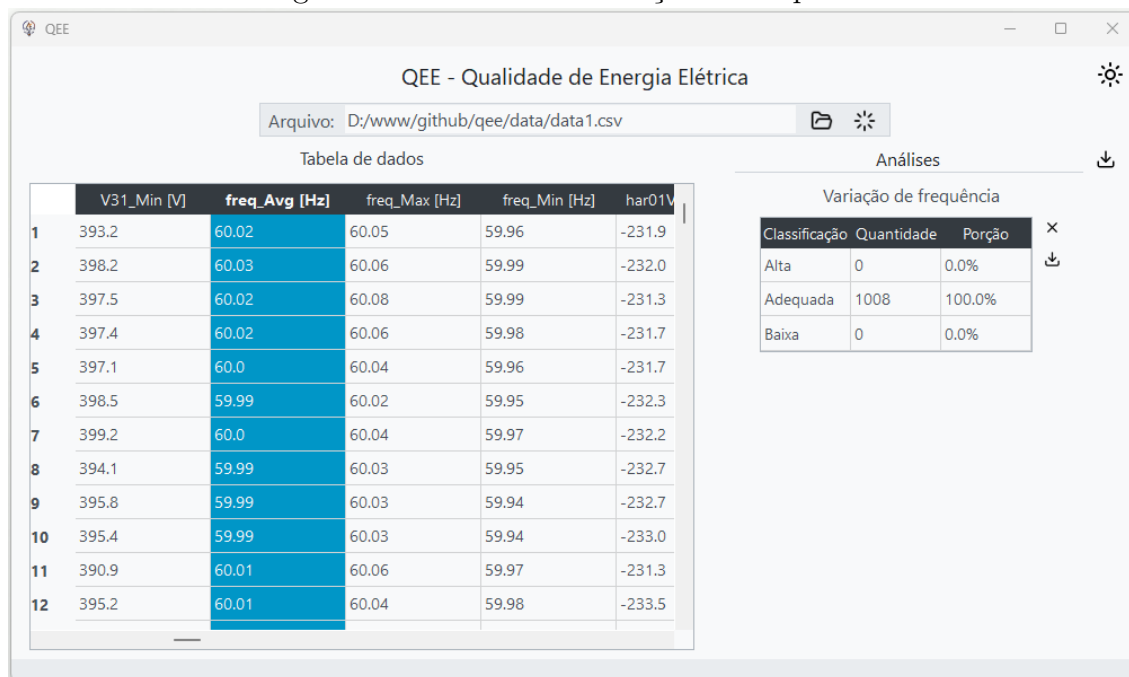


Fonte: Autoria própria.

5.1.7 Variação de frequência

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

Figura 19 – Análise da variação de frequência



Fonte: Autoria própria.

5.2 ANÁLISE DOS DADOS

Todos os resultados expostos nessa seção foram obtidos através da utilização de duas amostras de dados, coletadas pelo mesmo analisador de dados e dispostos nos Apêndices desse trabalho. Sendo:

- Apêndice A - gráficos das tensões com classificação - amostra 1, referente aos dados colhidos da medição no bloco dos professores I;
- Apêndice B - gráficos das tensões com classificação - amostra 2, para os dados colhidos da medição na usina fotovoltaica;
- Apêndice C - relatório de análise de QEE gerado pela rotina computacional - amostra 1;
- Apêndice D - relatório de análise de QEE gerado pela rotina computacional - amostra 2;

5.2.1 Variação de tensão

Nessa etapa foram efetuadas análises para as tensões de fase e linha, nas quais 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) está 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 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.

Ao comparar essas duas amostras, nota-se que a amostra 1 não está dentro dos limites enquanto que a amostra 2 está, com a exceção do indicador *DRC* para valores Máximos.

5.2.2 Fator de potência

Para o fator de potência a única amostra utilizada consistiu na amostra 1, isso porque a amostra 2 correspondia a uma medição antiga que não possuía os valores de fator de potência. Determinando assim 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).

5.2.3 Distorções harmônicas

Os indicadores de distorções harmônicas encontrados para amostra 1 e amostra 2 foram dispostos na Tabela 12 e Tabela 13, respectivamente, em que V_1 , V_2 e V_3 são as tensões referentes aos harmônicos.

Tabela 12 – Indicadores de distorções harmônicas para amostra 1

Indicador	V_1 (%)	V_2 (%)	V_3 (%)	PRODIST (%)
$DTT_{95\%}$	1,65	1,83	1,80	10,00
$DTT_{p95\%}$	0,17	0,19	0,18	2,50
$DTT_{i95\%}$	1,63	1,80	1,70	7,50
$DTT_{395\%}$	0,38	0,52	0,71	6,50

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 – Indicadores de distorções harmônicas para amostra 2

Indicador	V_1 (%)	V_2 (%)	V_3 (%)	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.

Observa-se, em ambos os casos, que os valores estão dentro do estabelecido pelo PRODIST.

5.2.4 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 (%)
<i>FD95%</i>	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 (%)
<i>FD95%</i>	1,11	1,11	1,15	3,00

Fonte: Autoria própria.

Mais uma vez, em ambos os casos, os indicadores estão dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST.

5.2.5 Flutuação de tensão

Para esse indicador, foram encontrados valores para as três tensões, como mostram 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)
<i>P_{st}95%</i>	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)
<i>P_{st}95%</i>	0,26	0,28	0,30	1,00

Fonte: Autoria própria.

Novamente, tanto no primeiro quanto no segundo caso, os indicadores permanecem dentro dos parâmetros estipulados pelo PRODIST.

5.2.6 Variação de frequência

A amostra 1 obteve as classificações apresentadas na 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 frequência 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.

Nos dois cenários, observa-se que a maioria das classificações de frequências se enquadram em situação adequada, com um pequeno percentual inferior a 1%, seja para alta ou baixa, fora disso.

6 CONCLUSÃO

Levando em consideração que vários dispositivos elétricos são sensíveis a variação de tensão e corrente, procedimentos são adotados pela ANEEL para caracterizar a qualidade de energia elétrica. Nesse contexto, o trabalho propôs o desenvolvimento de uma rotina em Python que efetue essa caracterização para uma unidade consumidora.

Partindo disso, foi elaborado um código em Python, com abordagem modular e composta por classes, tendo uma classe geral para conexão das demais, responsáveis pelo cálculo dos indicadores, com a interface gráfica desenvolvida para facilitar o uso.

Para o teste da rotina foram utilizados dados reais obtidos por meio de um analisador de rede dessa própria instituição, em dois pontos de acoplamento e épocas distintas. Para a análise dos dados, a medida que se utiliza os *software*, gráficos podem ser gerados, facilitando a classificação dos níveis de tensão. Ademais, é possível gerar um relatório de QEE com base nos índices e limites estabelecidos no PRODIST.

Portanto, a rotina computacional elaborada nesse trabalho foi capaz de facilitar a análise de QEE e as hipóteses estabelecidas como objetivos foram alcançadas. Espera-se que o produto gerado possa auxiliar pesquisas e análises de QEE futuramente, servindo como ponto de partida para possíveis trabalhos futuros:

- inserir uma função para alterar qual o intervalo de dados da planilha será usado;
- gerar a plotagem do gráfico em função do tempo;
- inserir imagens dos gráficos no relatório gerado;
- descrever um relatório mais minucioso da situação da unidade consumidora;
- gerar o executável do *software*.

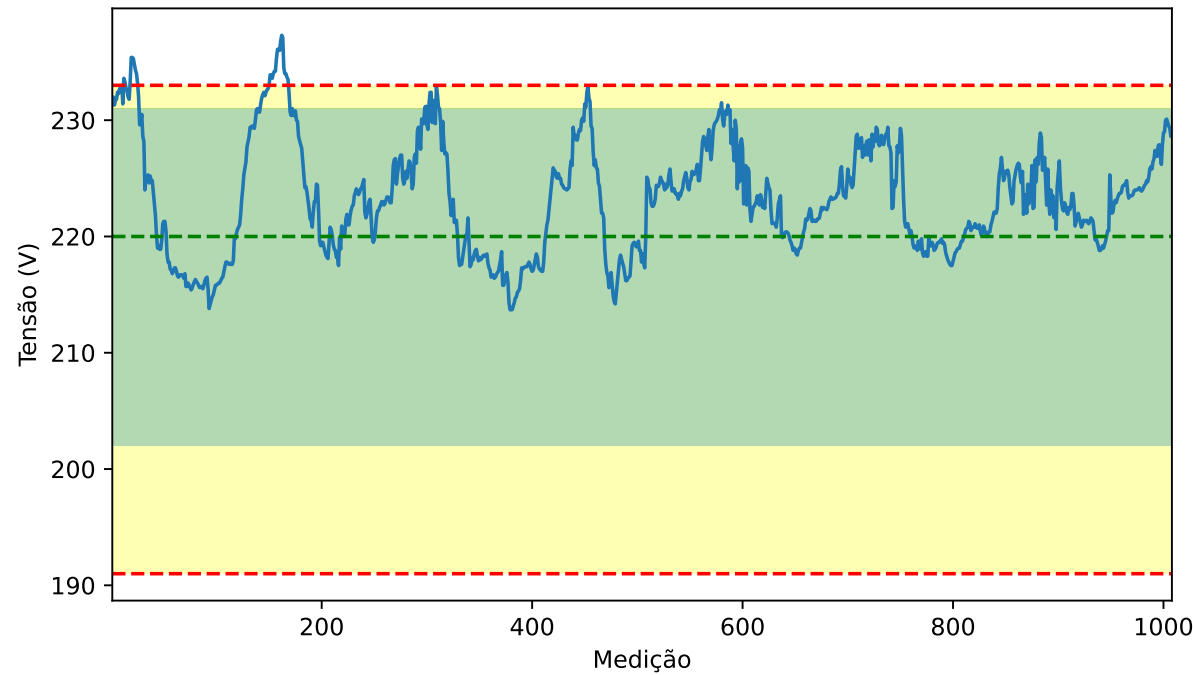
REFERÊNCIAS

- 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. [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.
- MCKINNEY, W. **Python for Data Analysis**. 3rd. ed. [S.l.]: O'Reilly Media, Inc., 2022.
- MINIPA. **ET-5051C/ET5061C**. São Paulo, 2019.
- 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.

Apêndices

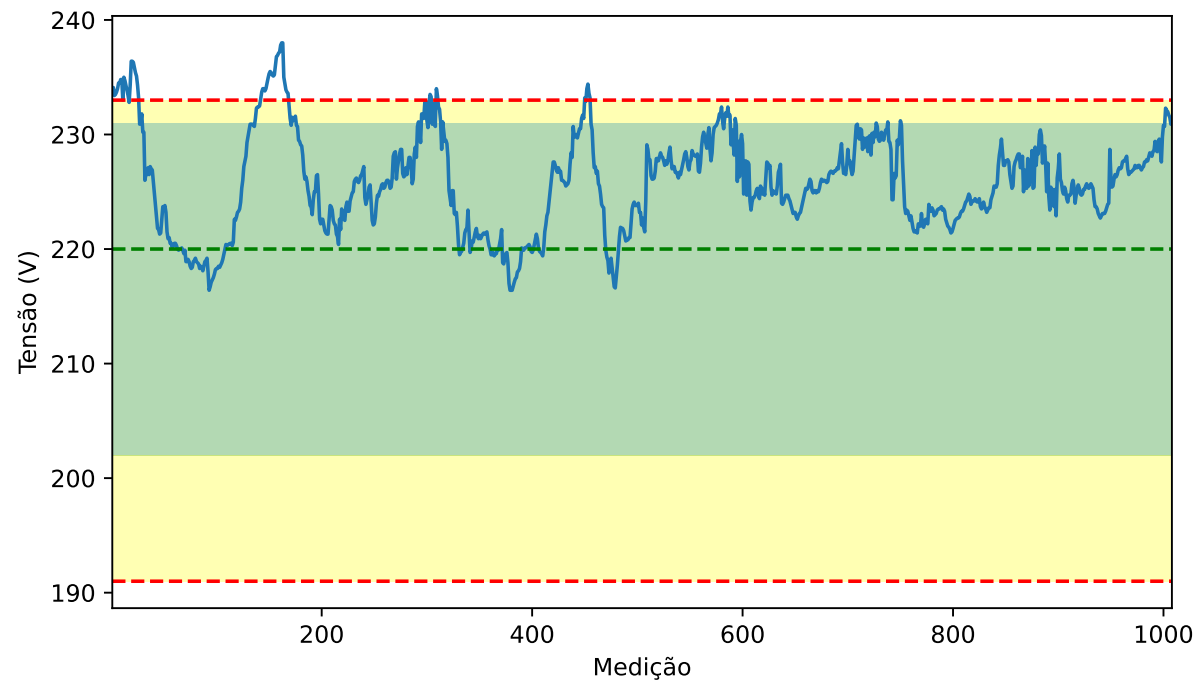
**APÊNDICE A – GRÁFICOS DAS TENSÕES COM CLASSIFICAÇÃO -
AMOSTRA 1**

Figura 20 – Gráfico para tensão V1 de fase média



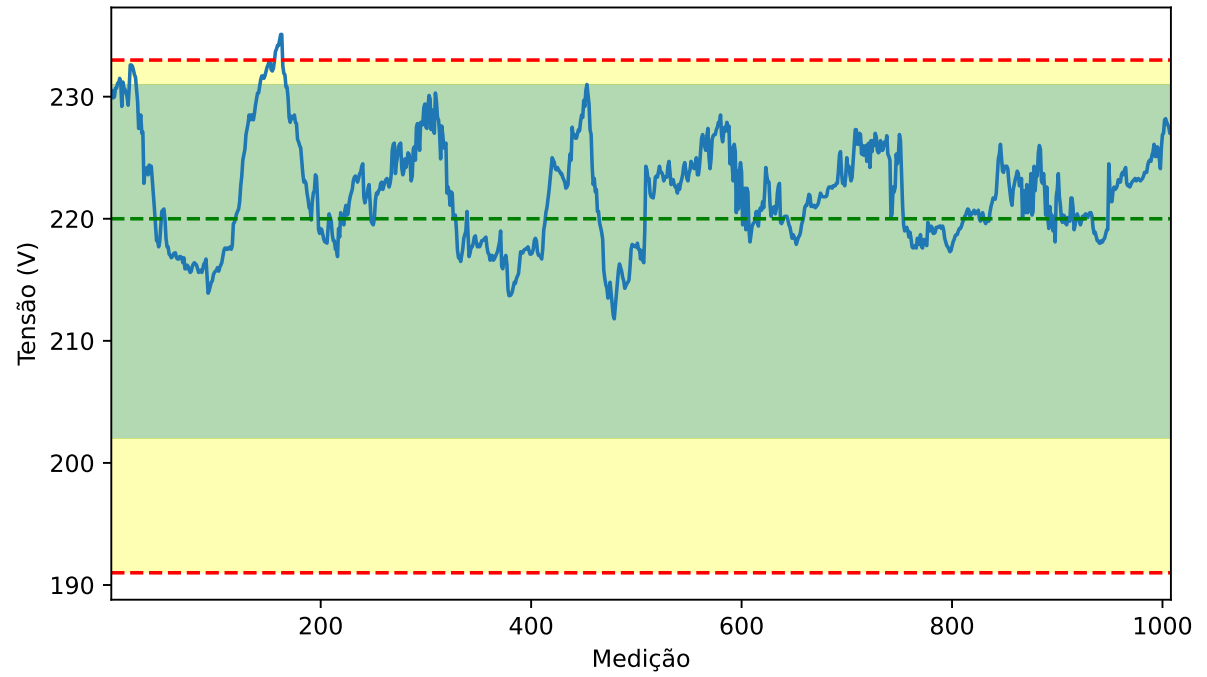
Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Gráfico para tensão V2 de fase média



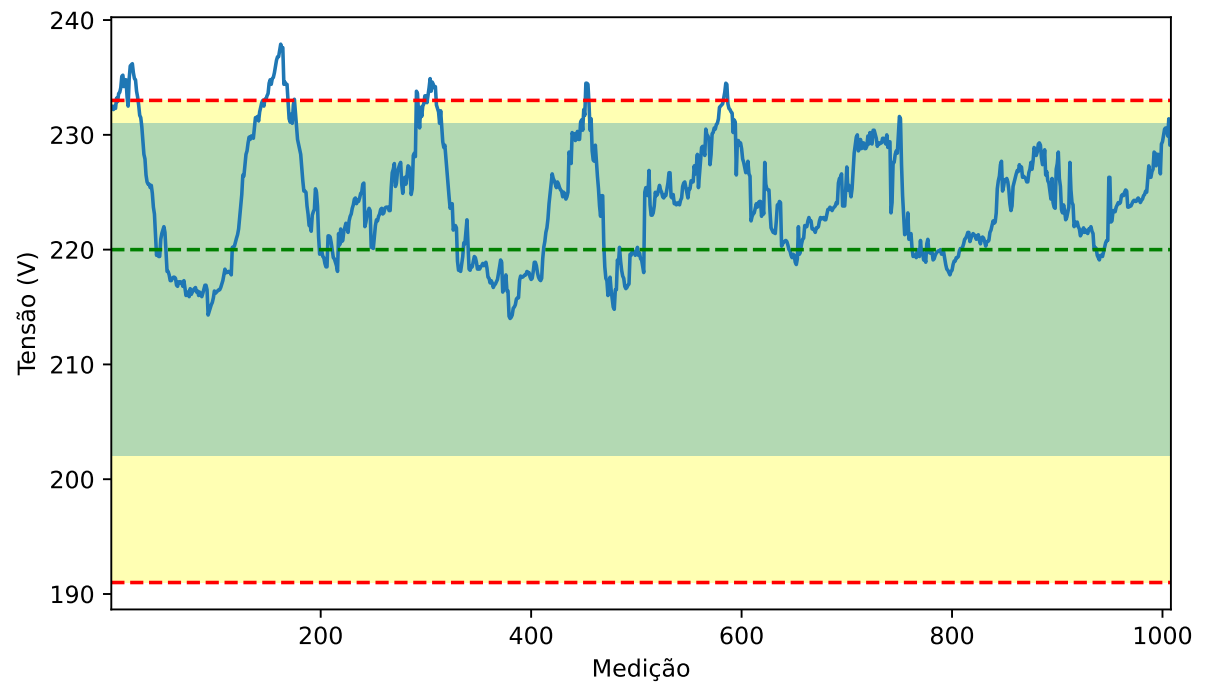
Fonte: Autoria própria.

Figura 22 – Gráfico para tensão V3 de fase média



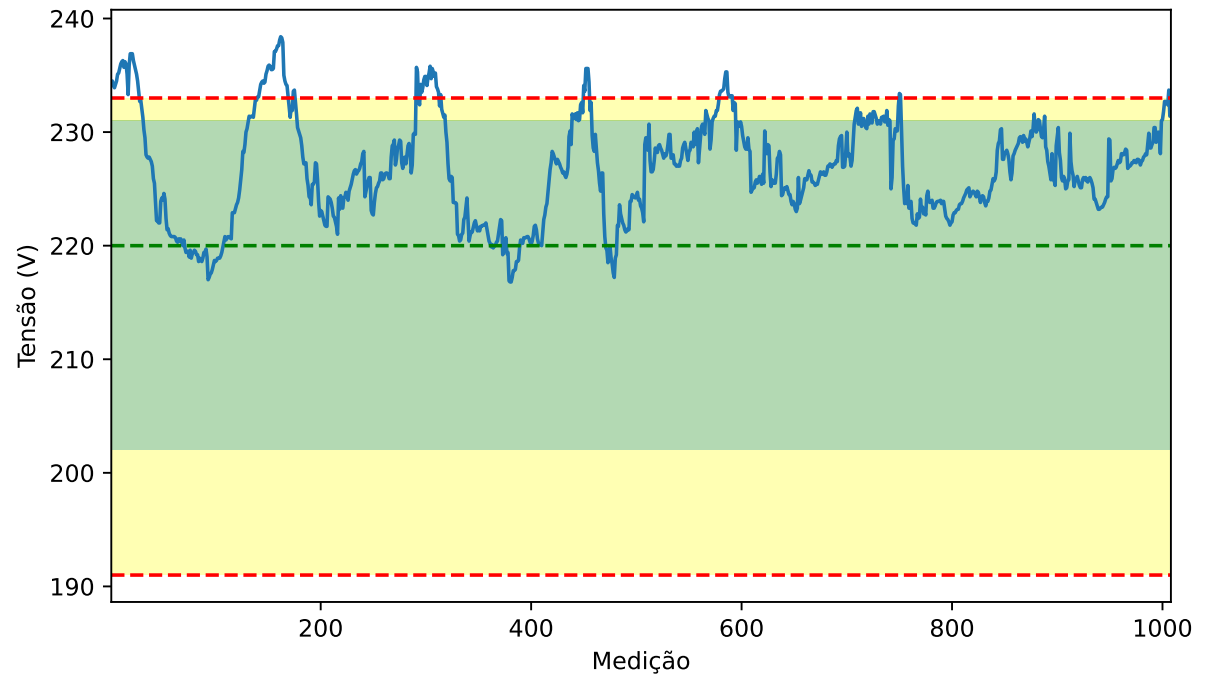
Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Gráfico para tensão V1 de fase máxima



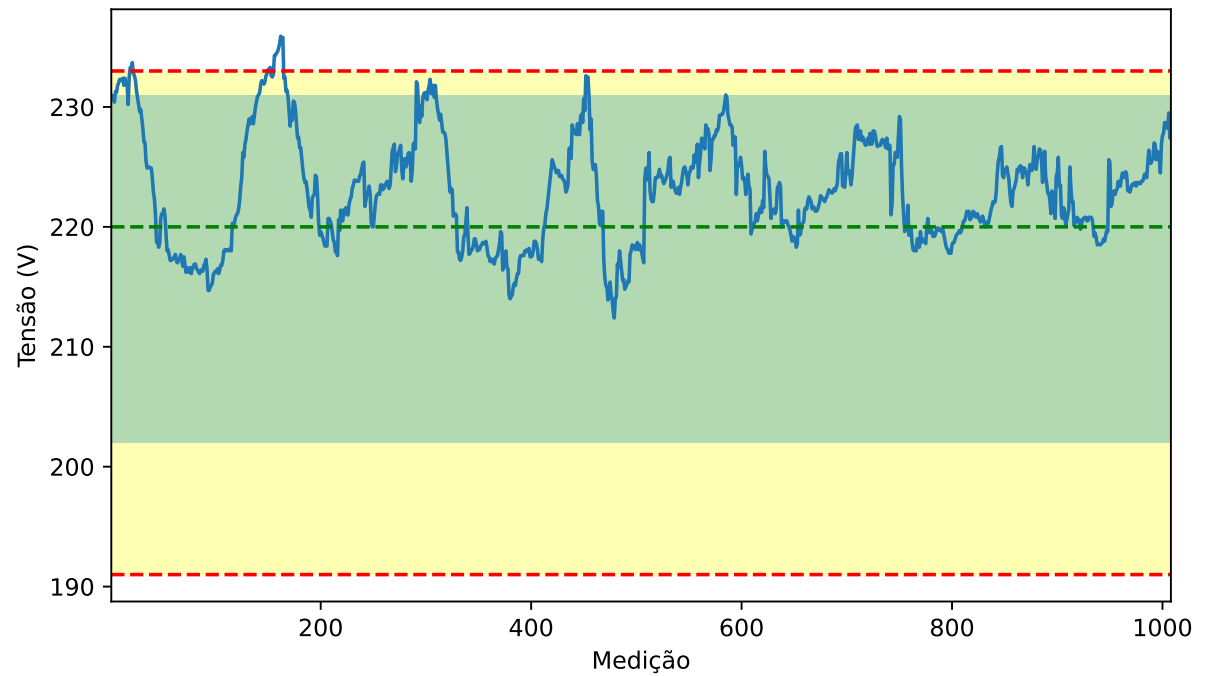
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Gráfico para tensão V2 de fase máxima



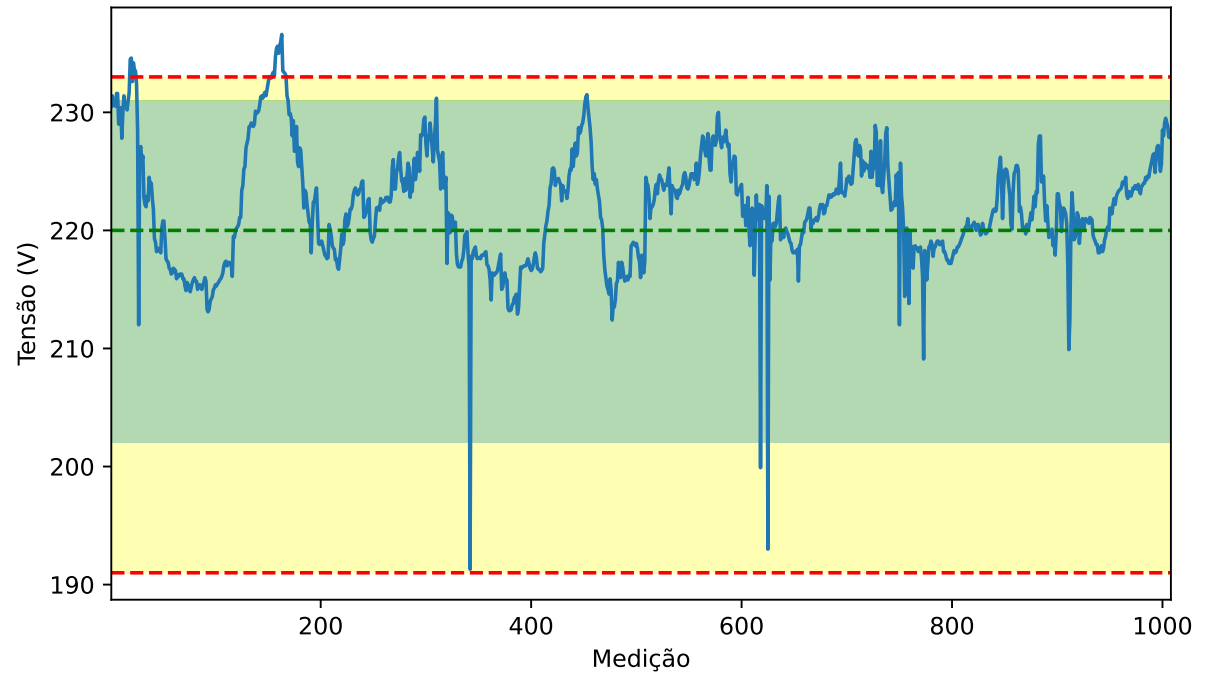
Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Gráfico para tensão V3 de fase máxima



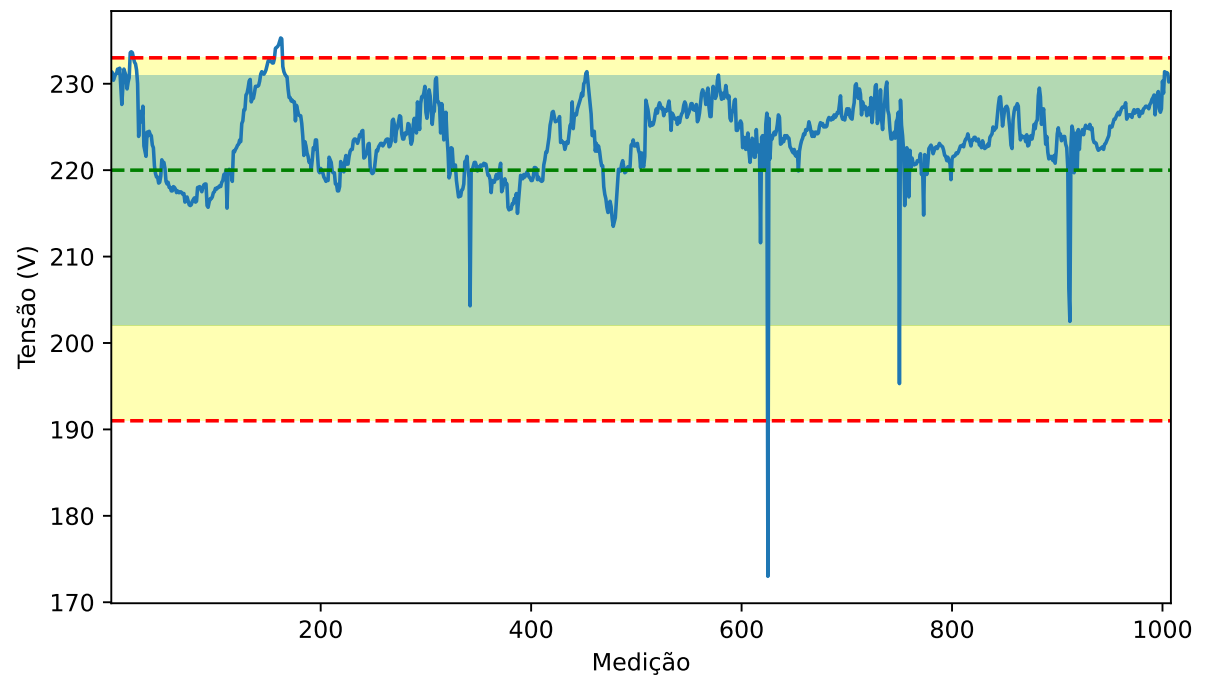
Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Gráfico para tensão V1 de fase mínima



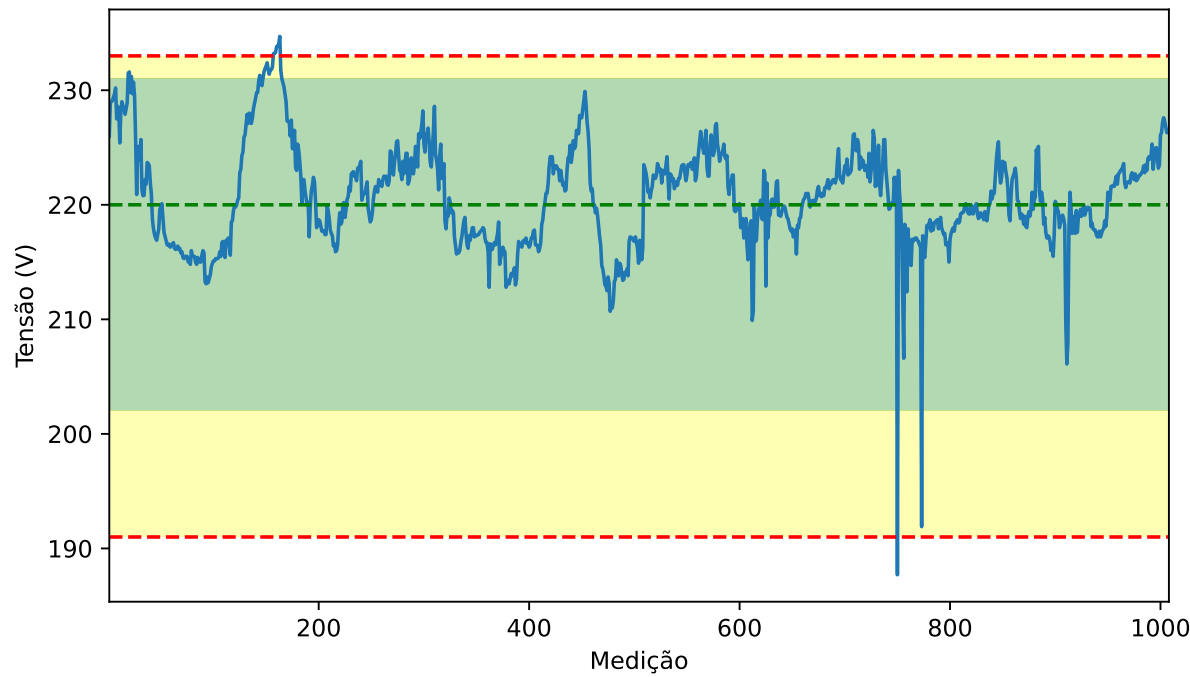
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Gráfico para tensão V2 de fase mínima



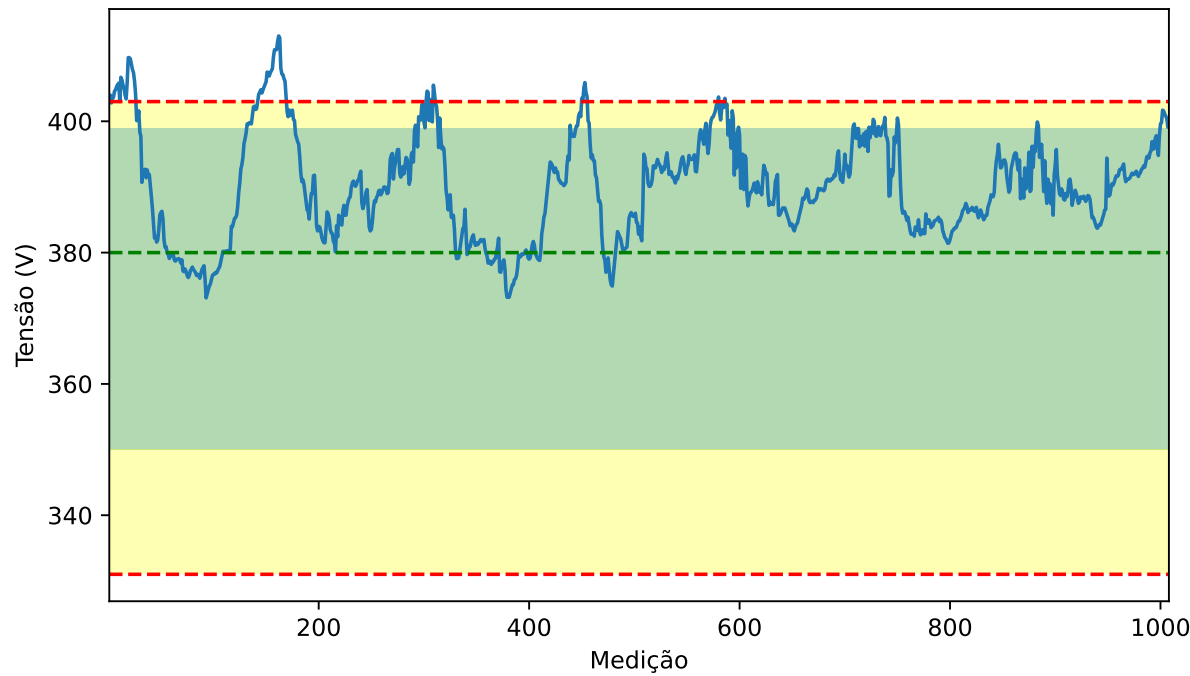
Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Gráfico para tensão V3 de fase mínima



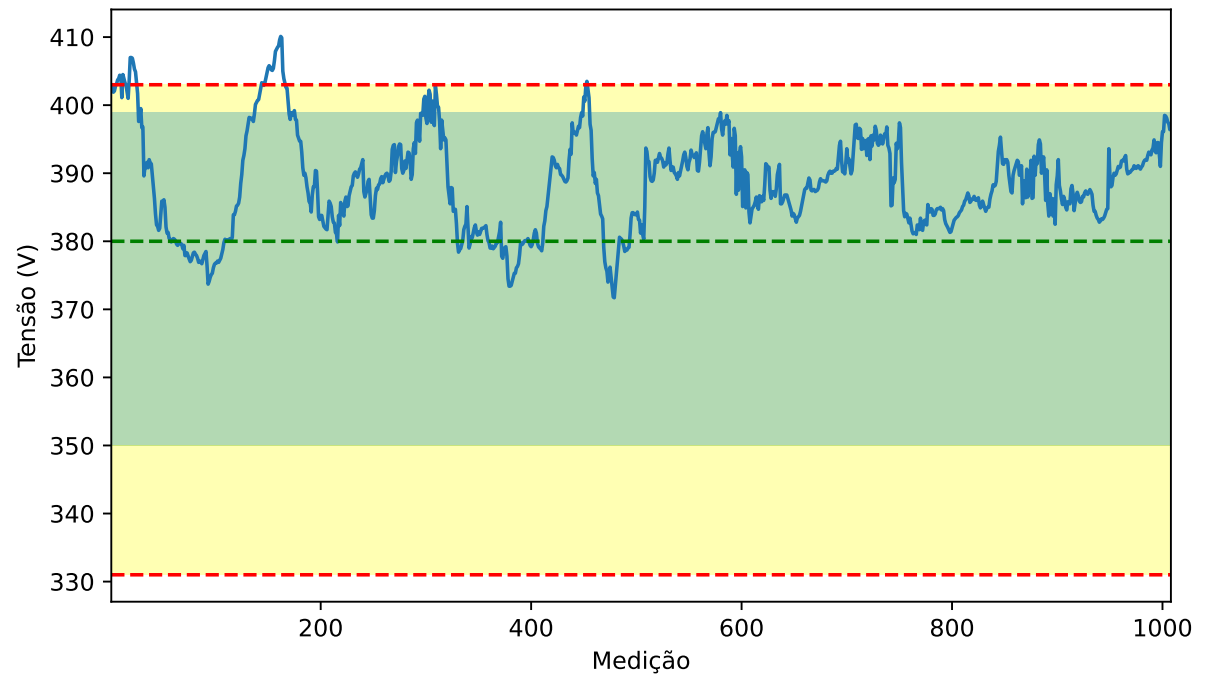
Fonte: Autoria própria.

Figura 29 – Gráfico para tensão V12 de linha média



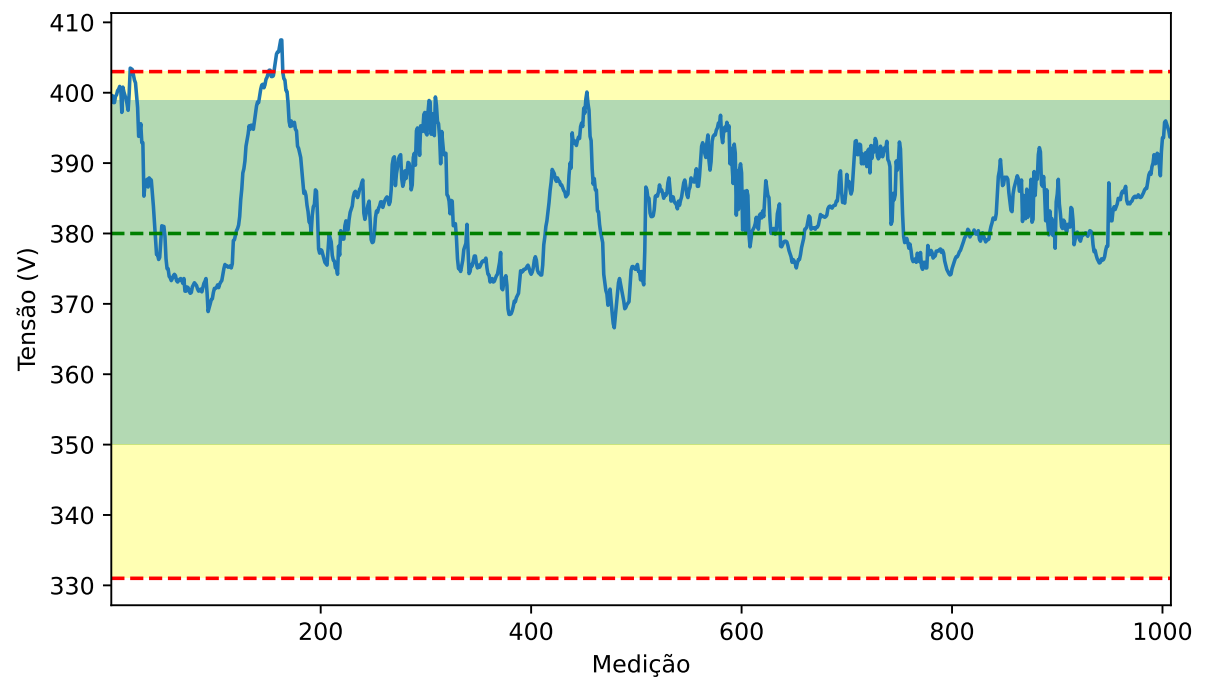
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 – Gráfico para tensão V23 de linha média



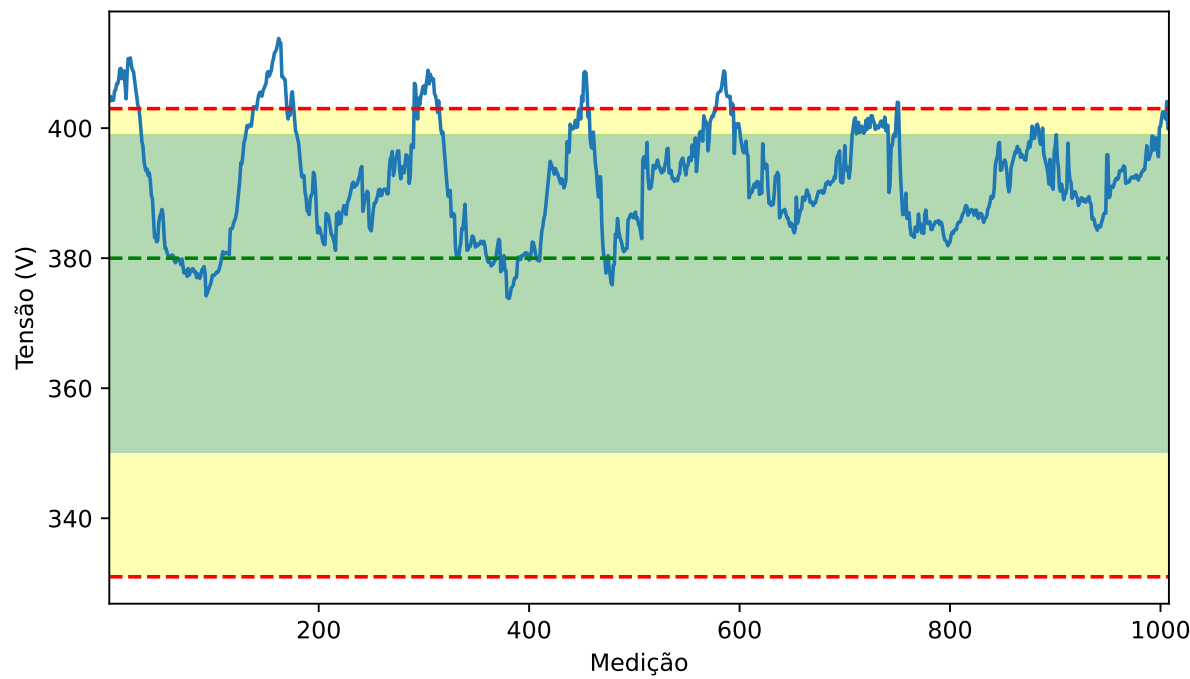
Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Gráfico para tensão V31 de linha média



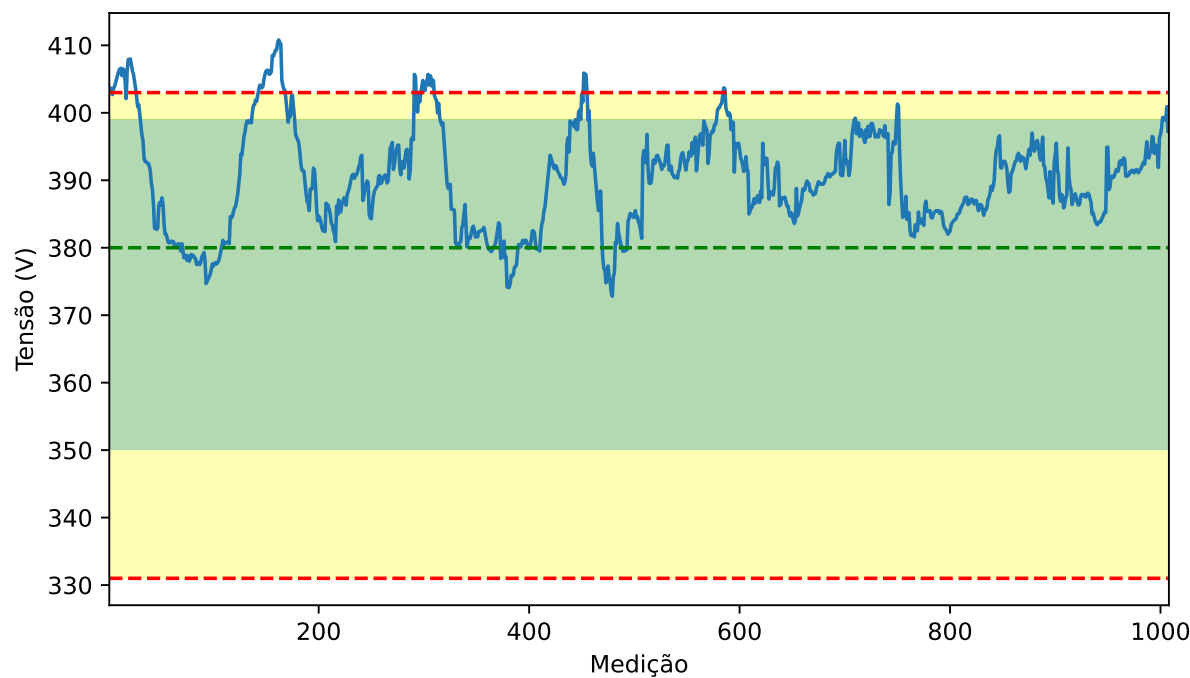
Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Gráfico para tensão V12 de linha máxima



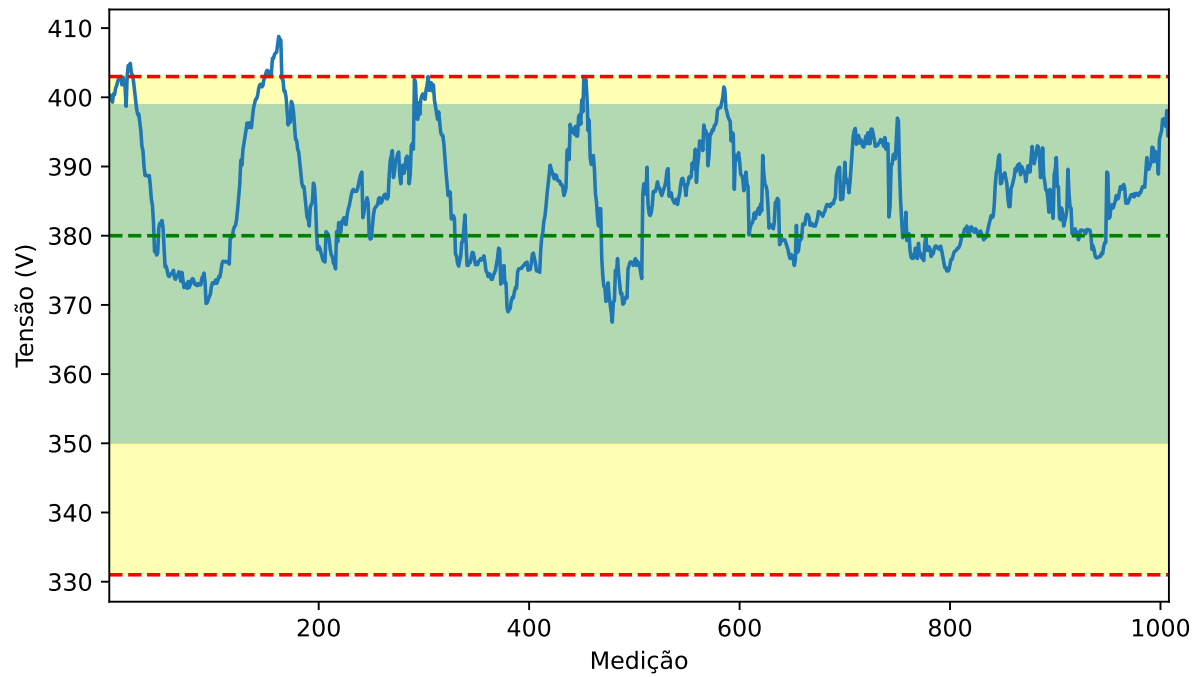
Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Gráfico para tensão V23 de linha máxima



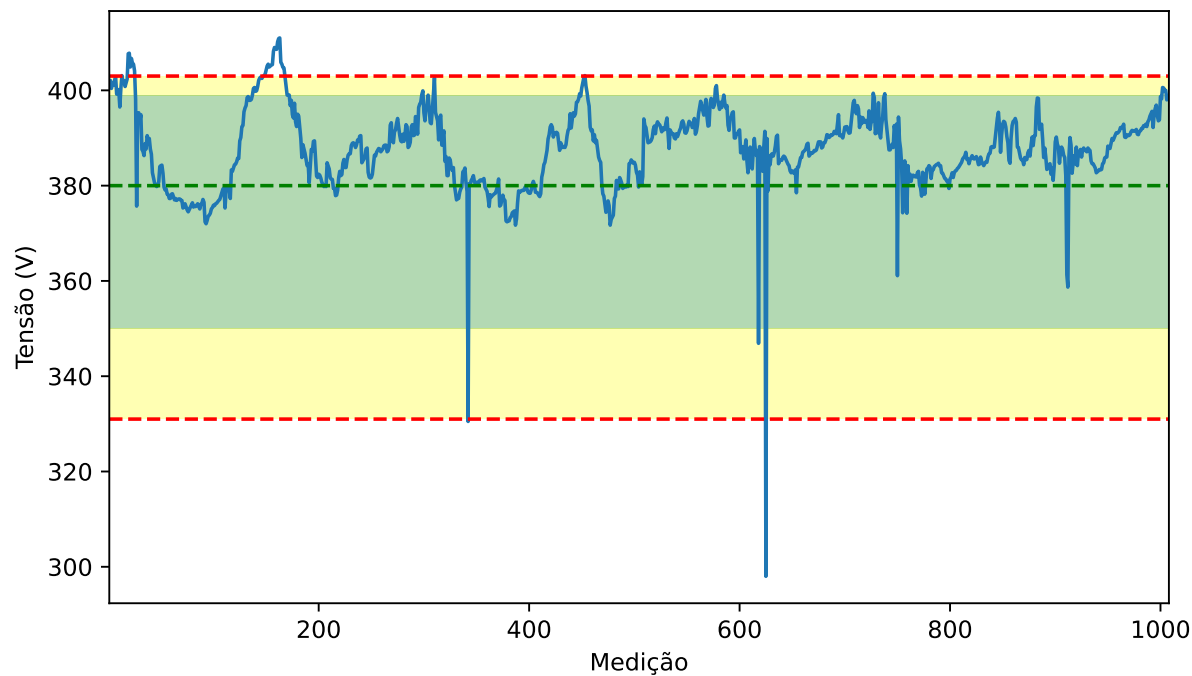
Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Gráfico para tensão V31 de linha máxima



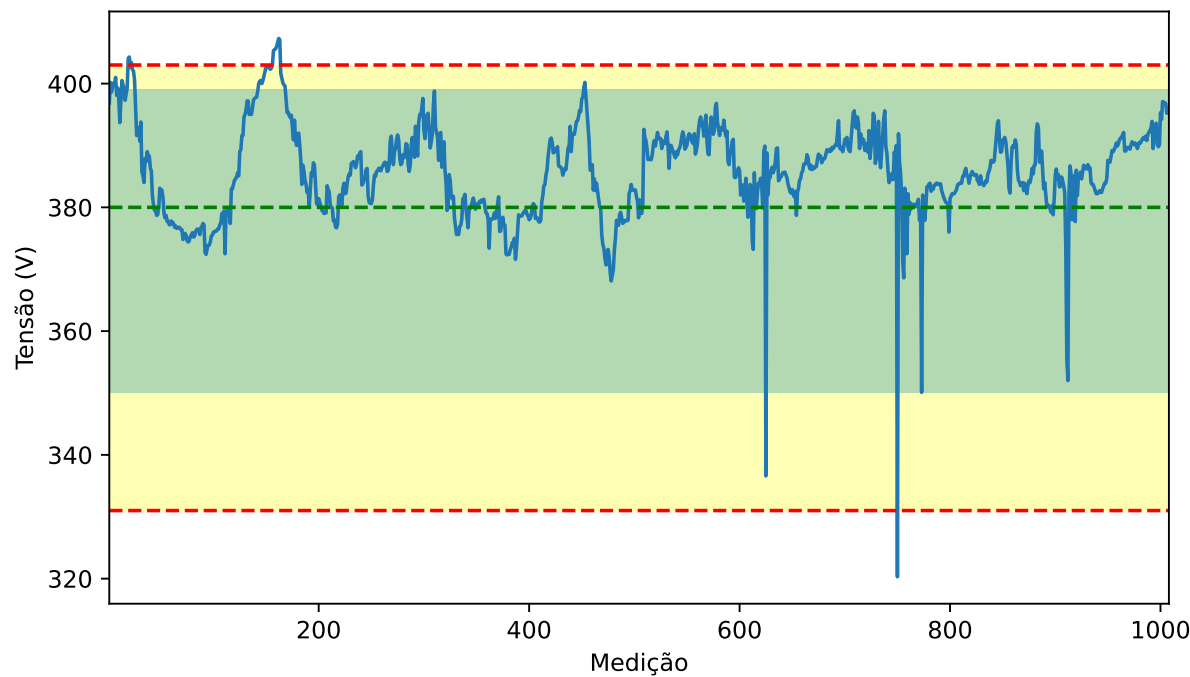
Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Gráfico para tensão V12 de linha mínima



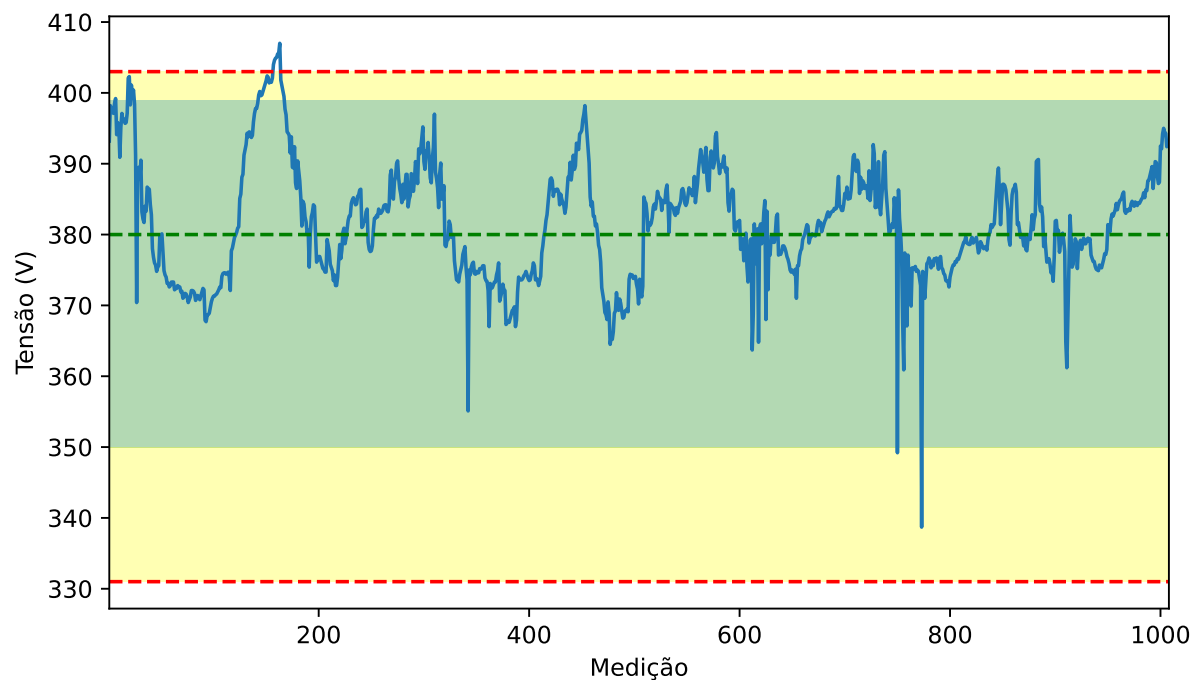
Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Gráfico para tensão V23 de linha mínima



Fonte: Autoria própria.

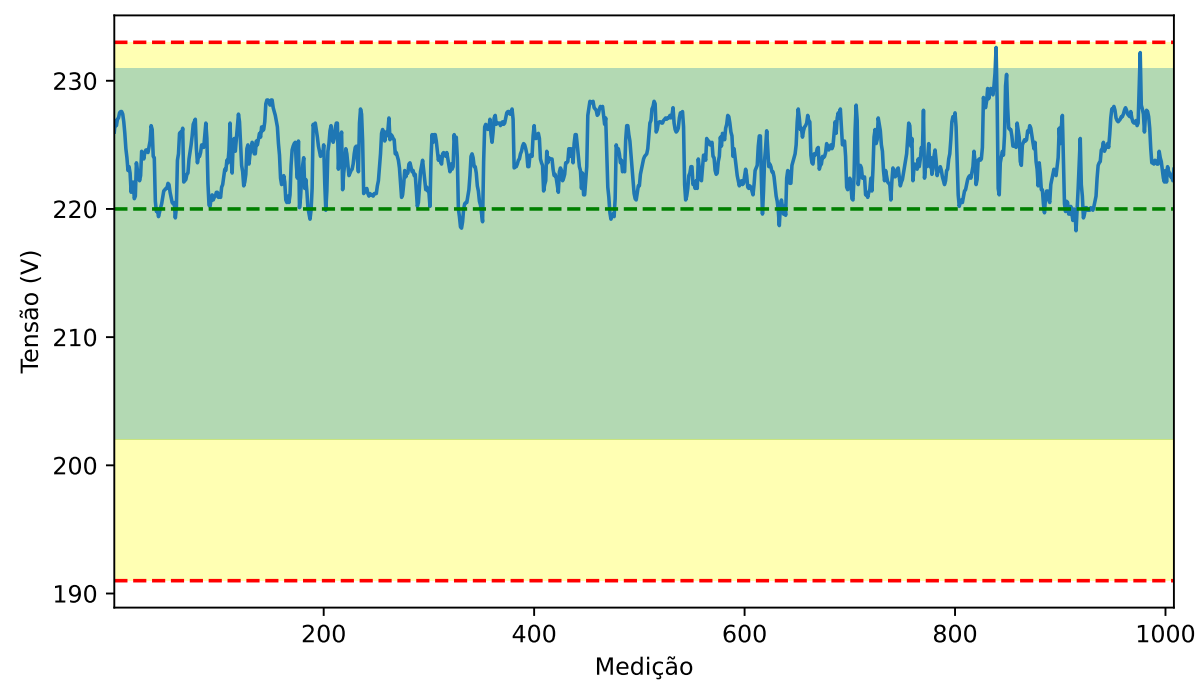
Figura 37 – Gráfico para tensão V31 de linha mínima



Fonte: Autoria própria.

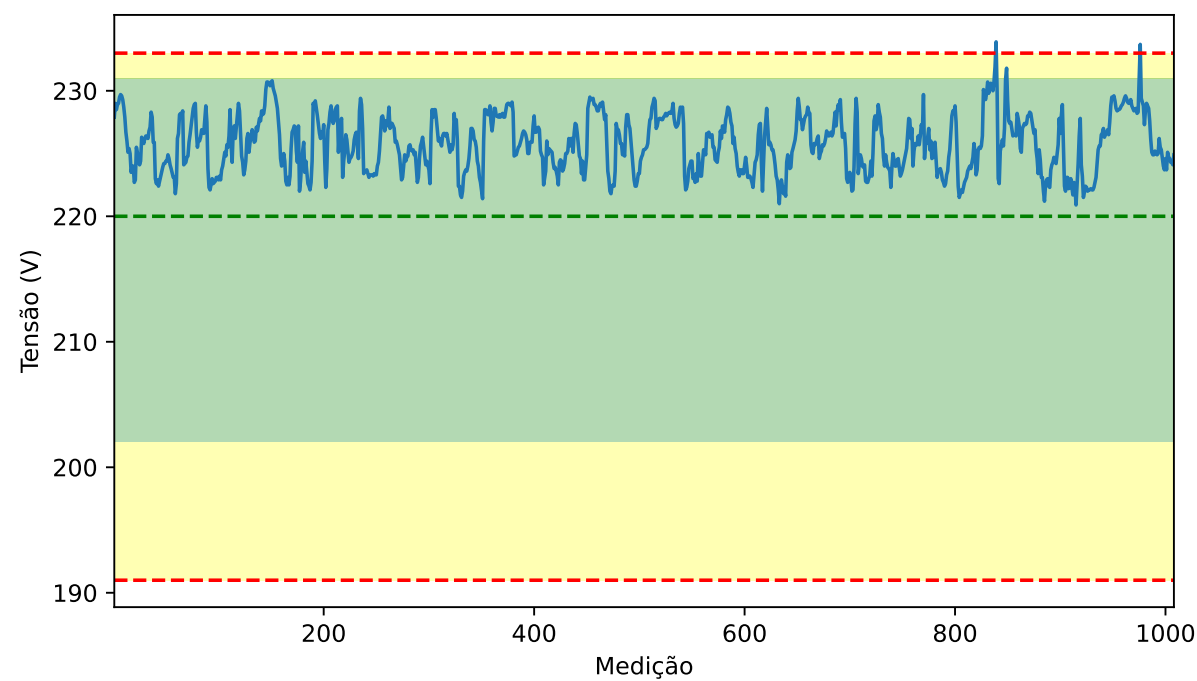
APÊNDICE B – GRÁFICOS DAS TENSÕES COM CLASSIFICAÇÃO - AMOSTRA 2

Figura 38 – Gráfico para tensão V1 de fase média



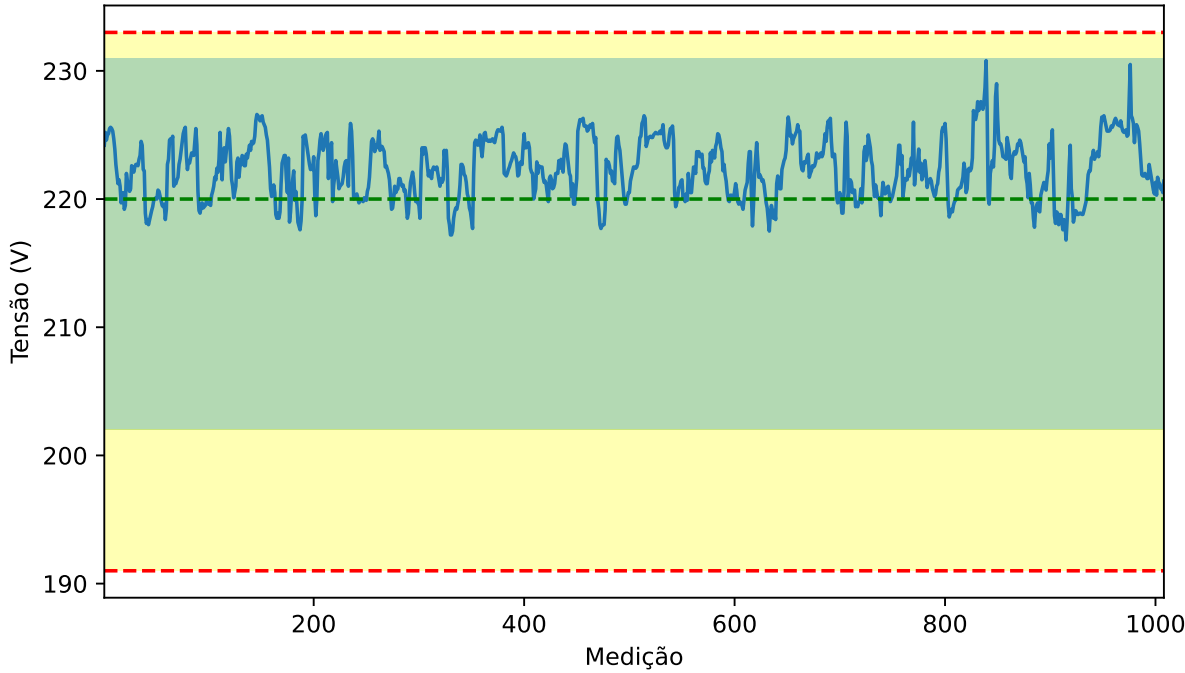
Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Gráfico para tensão V2 de fase média



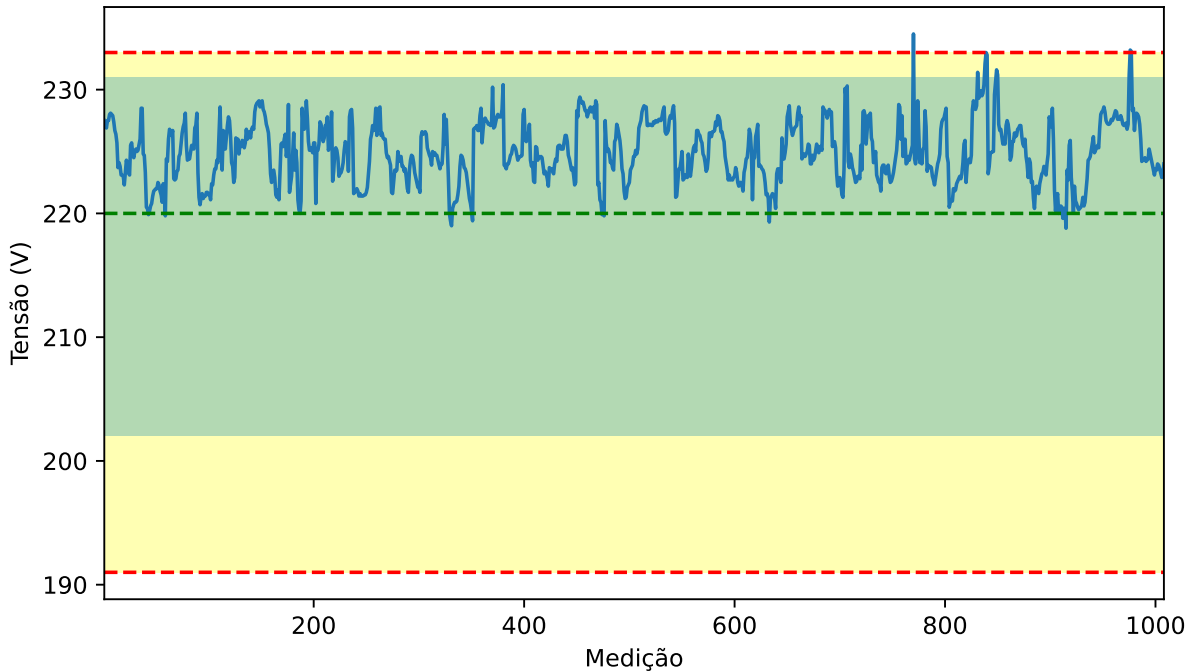
Fonte: Autoria própria.

Figura 40 – Gráfico para tensão V3 de fase média



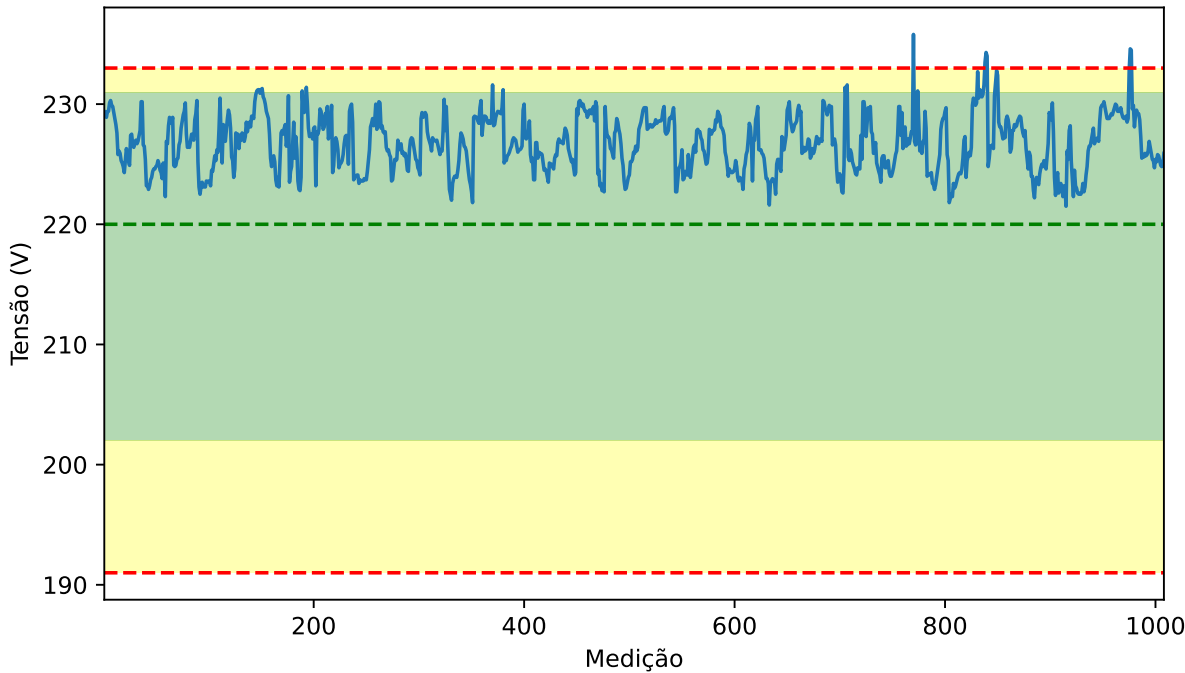
Fonte: Autoria própria.

Figura 41 – Gráfico para tensão V1 de fase máxima



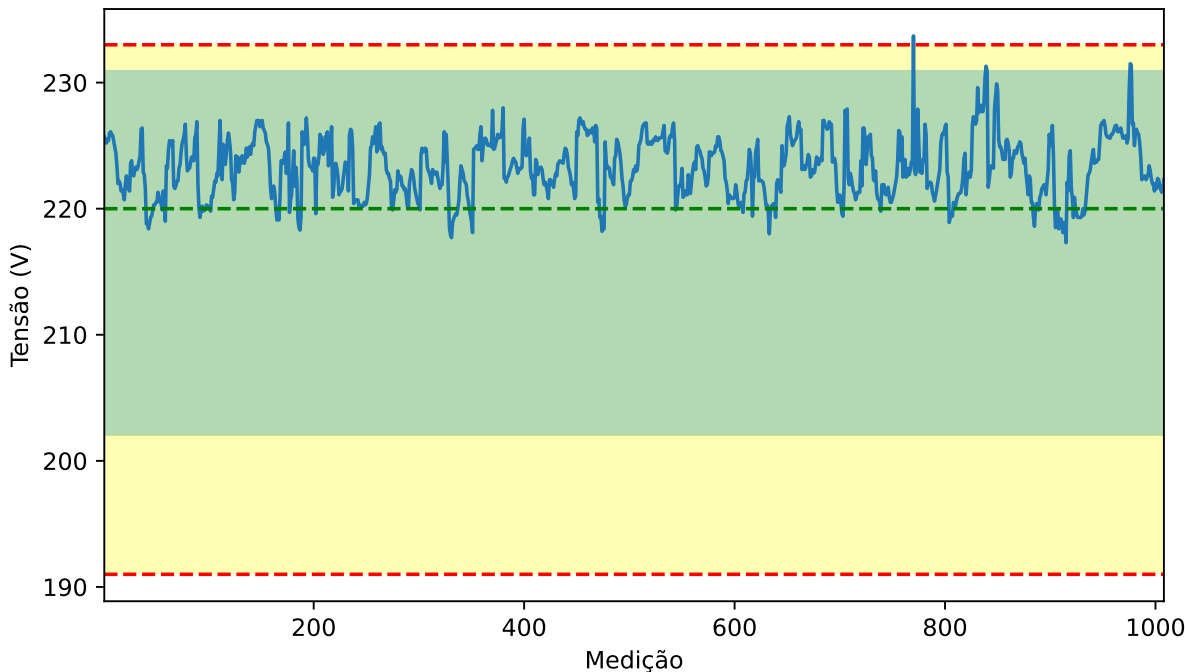
Fonte: Autoria própria.

Figura 42 – Gráfico para tensão V2 de fase máxima



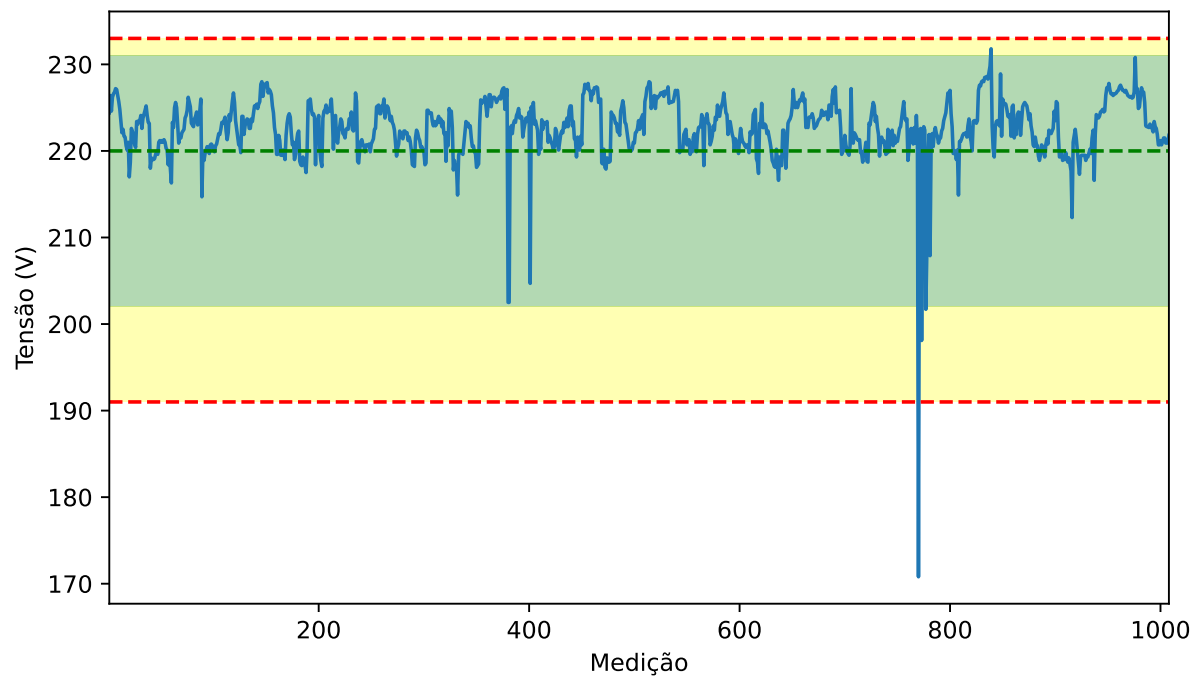
Fonte: Autoria própria.

Figura 43 – Gráfico para tensão V3 de fase máxima



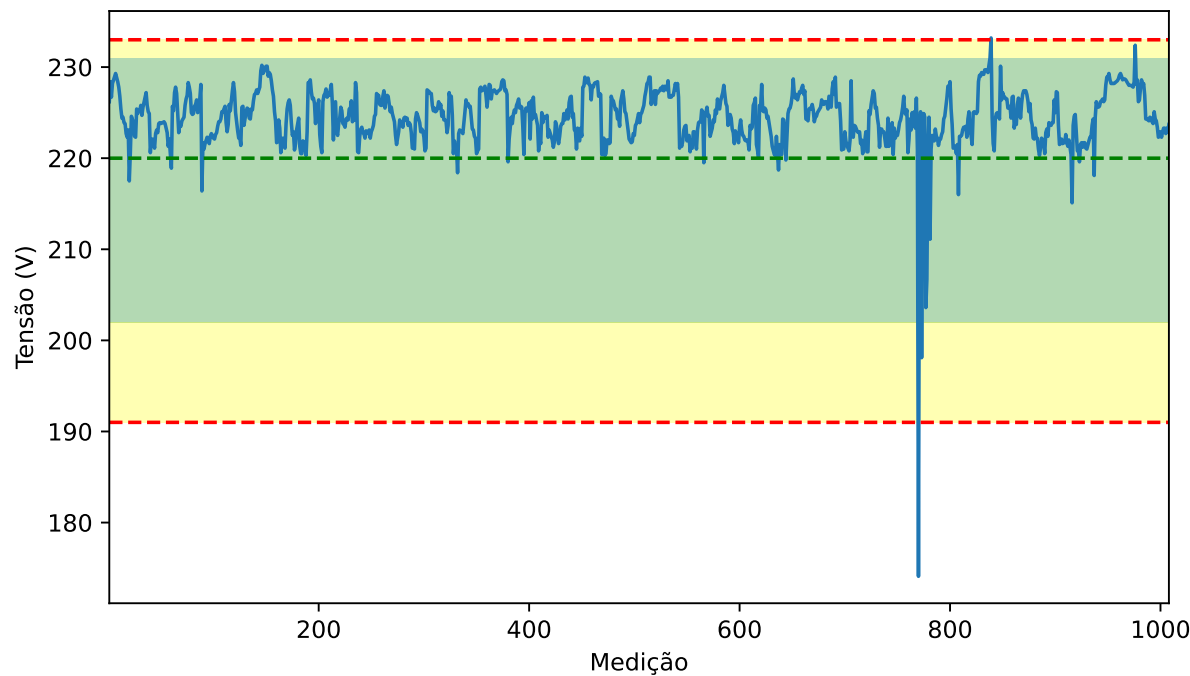
Fonte: Autoria própria.

Figura 44 – Gráfico para tensão V1 de fase mínima



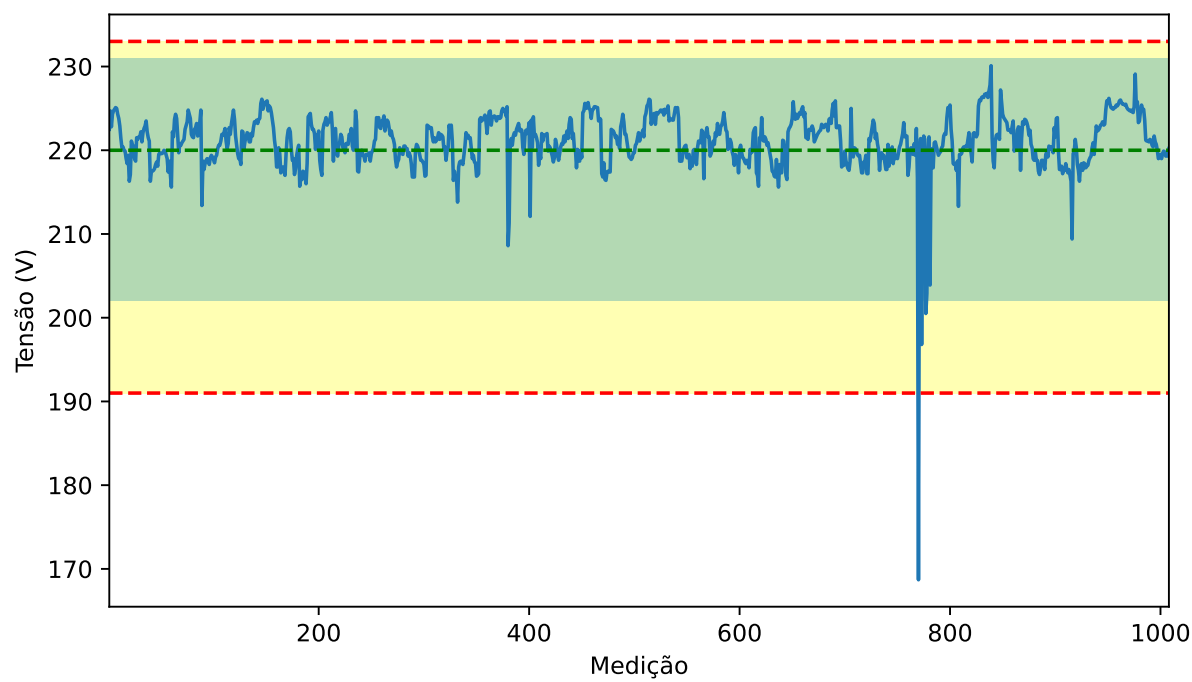
Fonte: Autoria própria.

Figura 45 – Gráfico para tensão V2 de fase mínima



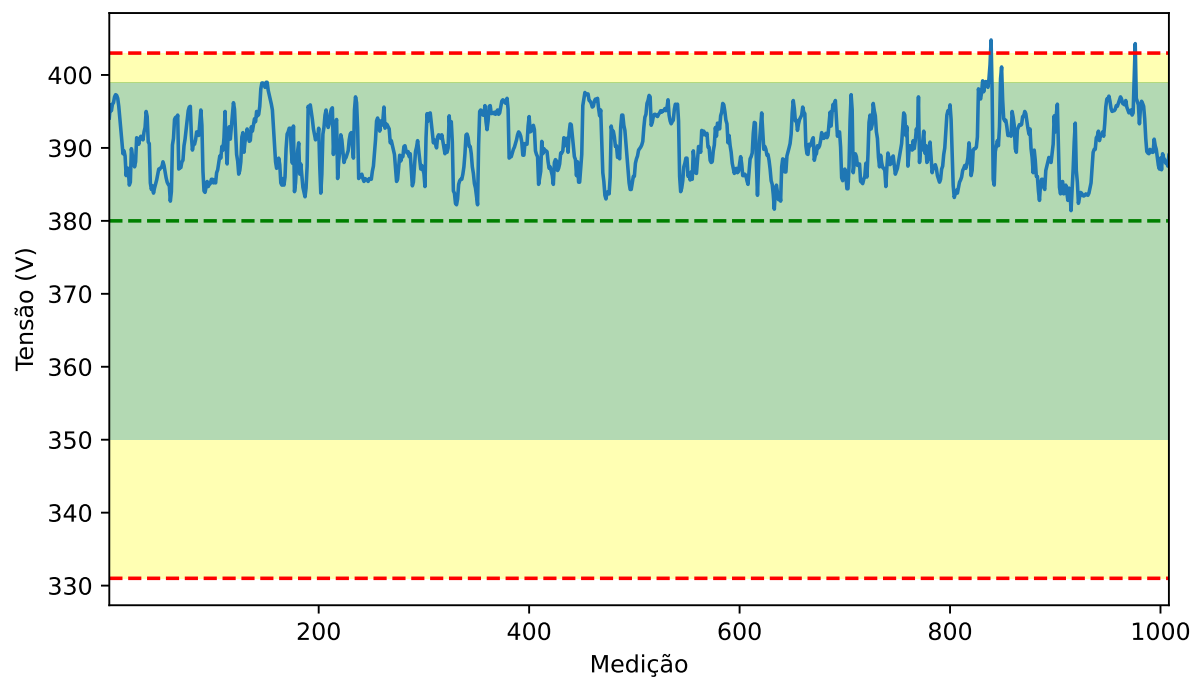
Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Gráfico para tensão V3 de fase mínima



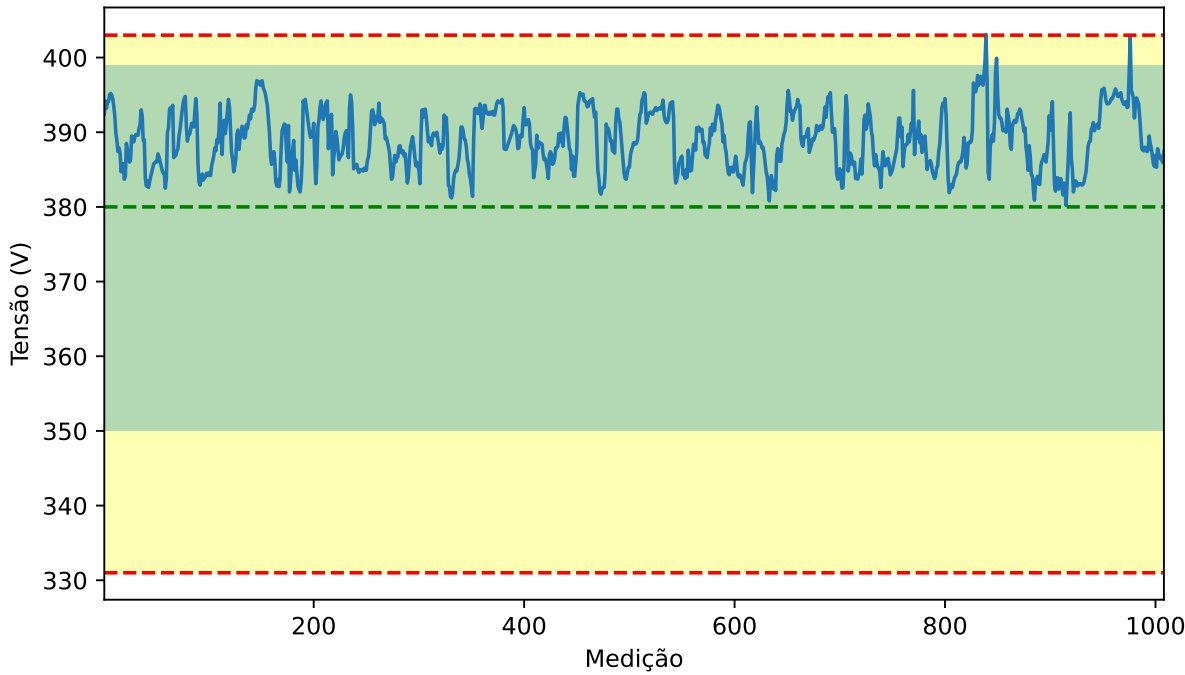
Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Gráfico para tensão V12 de linha média



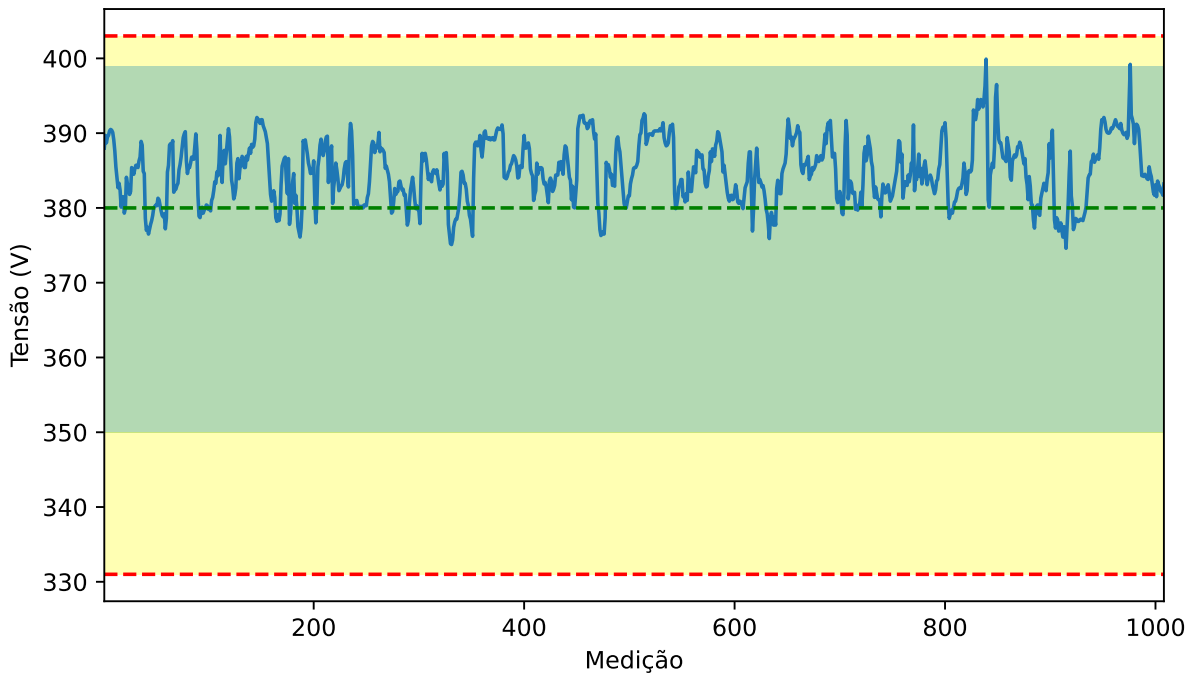
Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Gráfico para tensão V23 de linha média



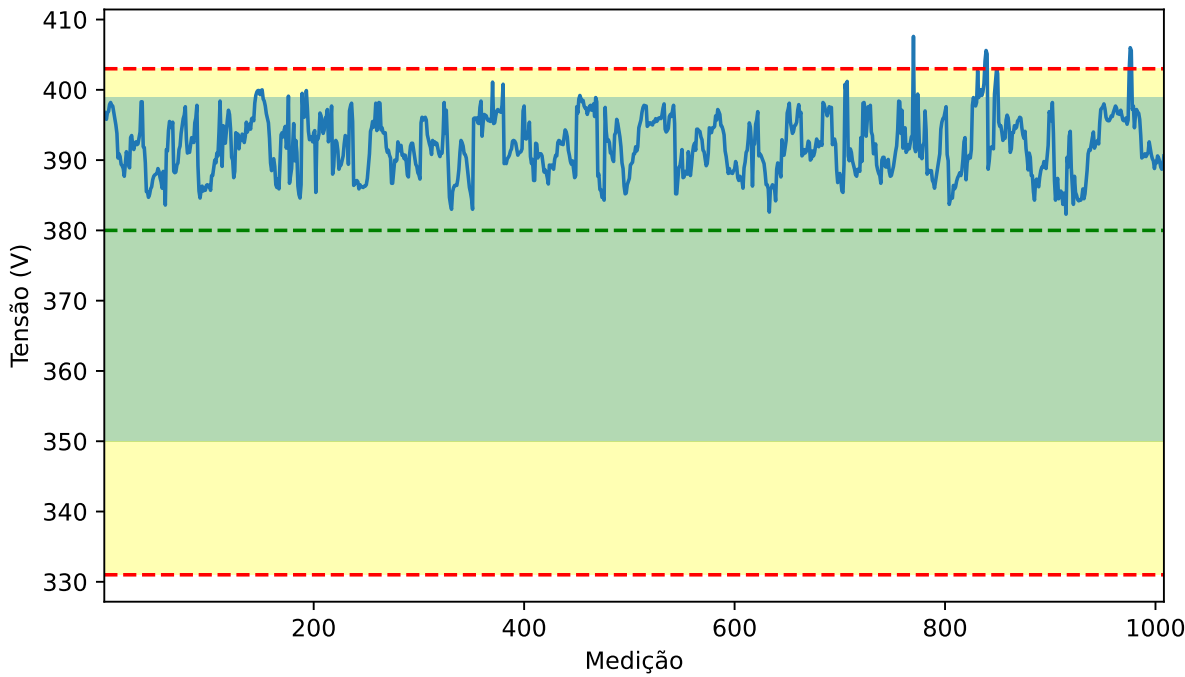
Fonte: Autoria própria.

Figura 49 – Gráfico para tensão V31 de linha média



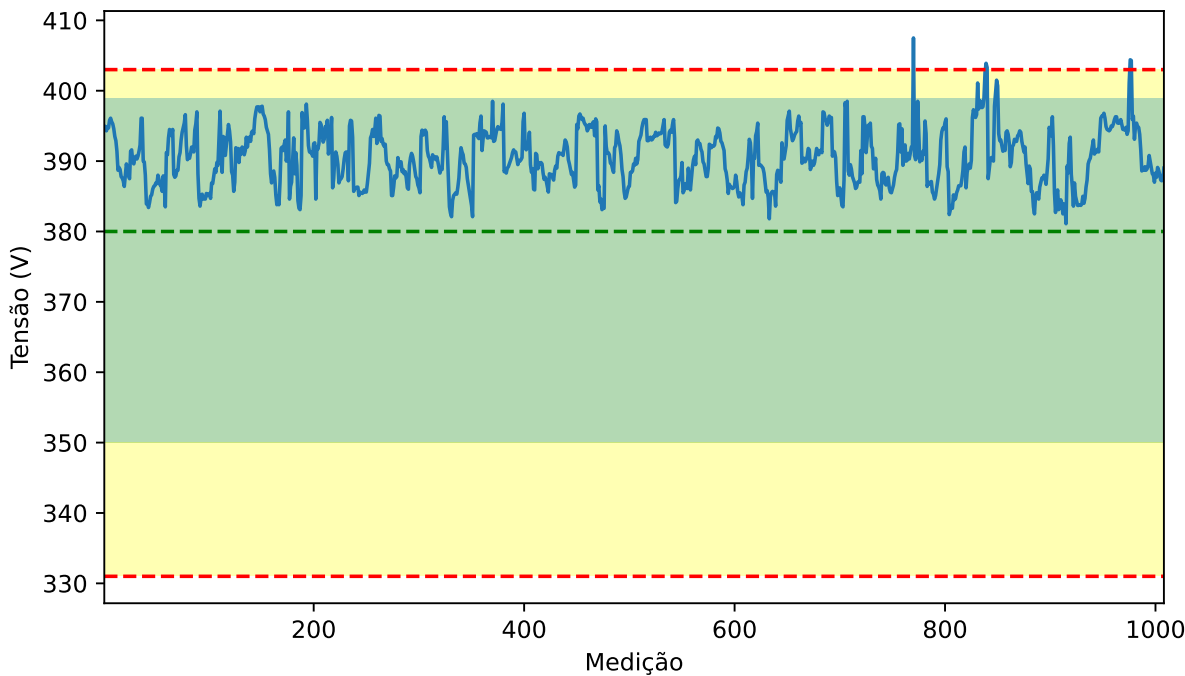
Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Gráfico para tensão V12 de linha máxima



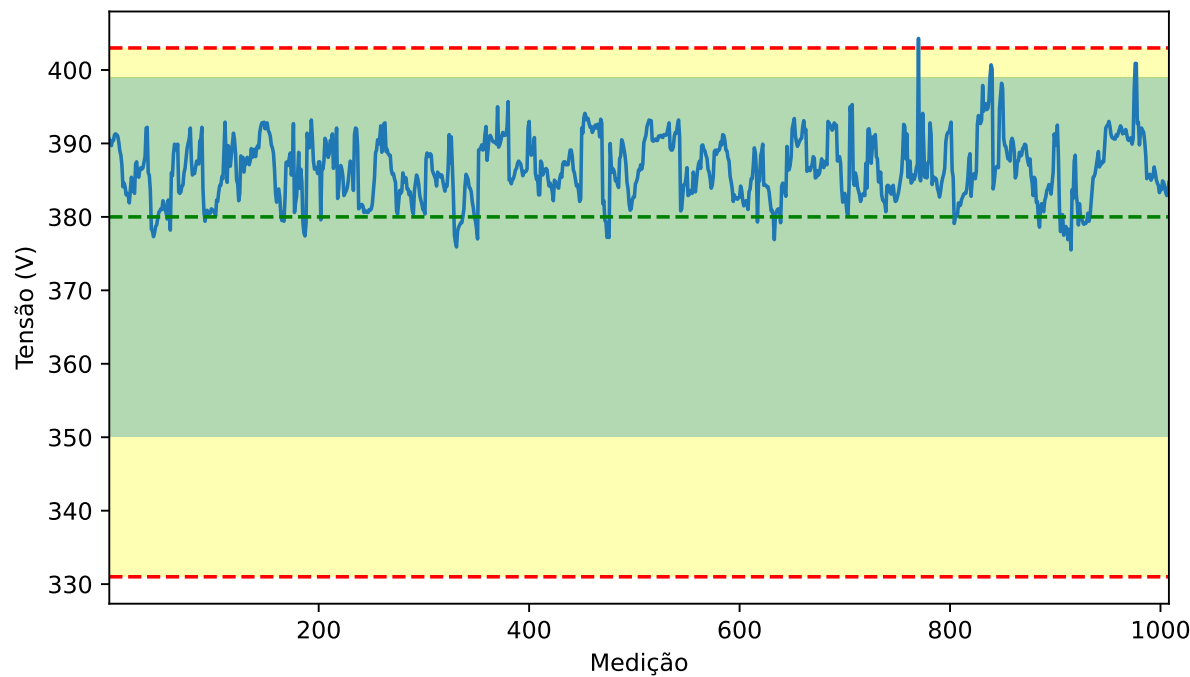
Fonte: Autoria própria.

Figura 51 – Gráfico para tensão V23 de linha máxima



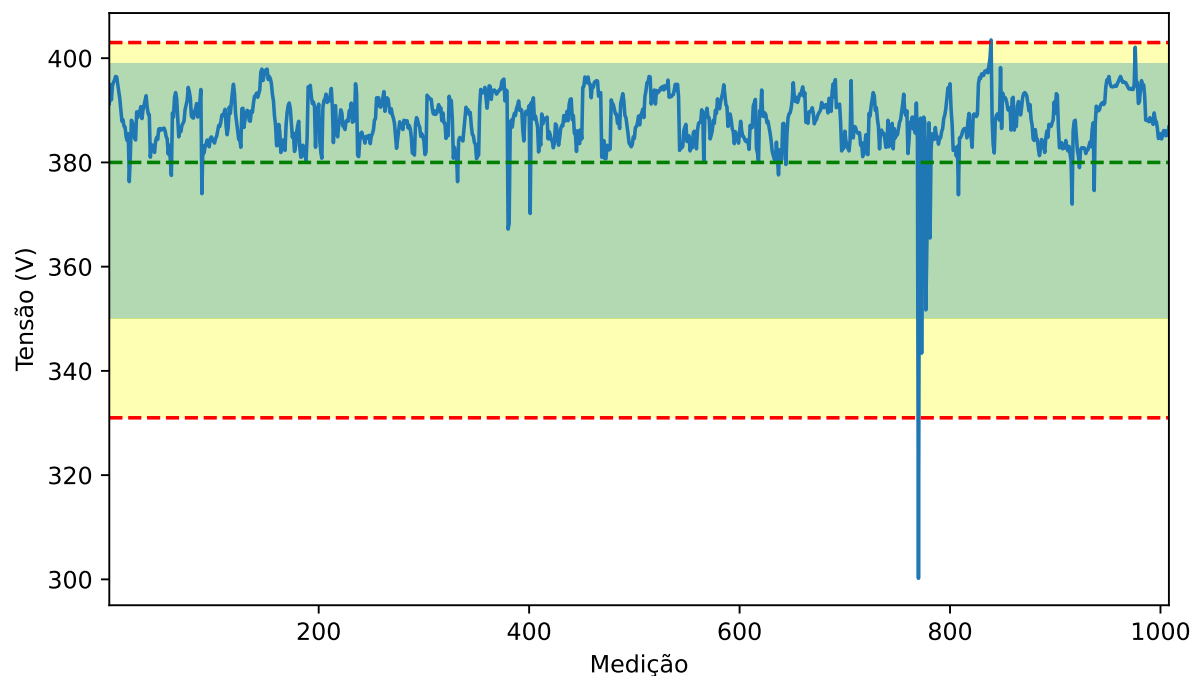
Fonte: Autoria própria.

Figura 52 – Gráfico para tensão V31 de linha máxima



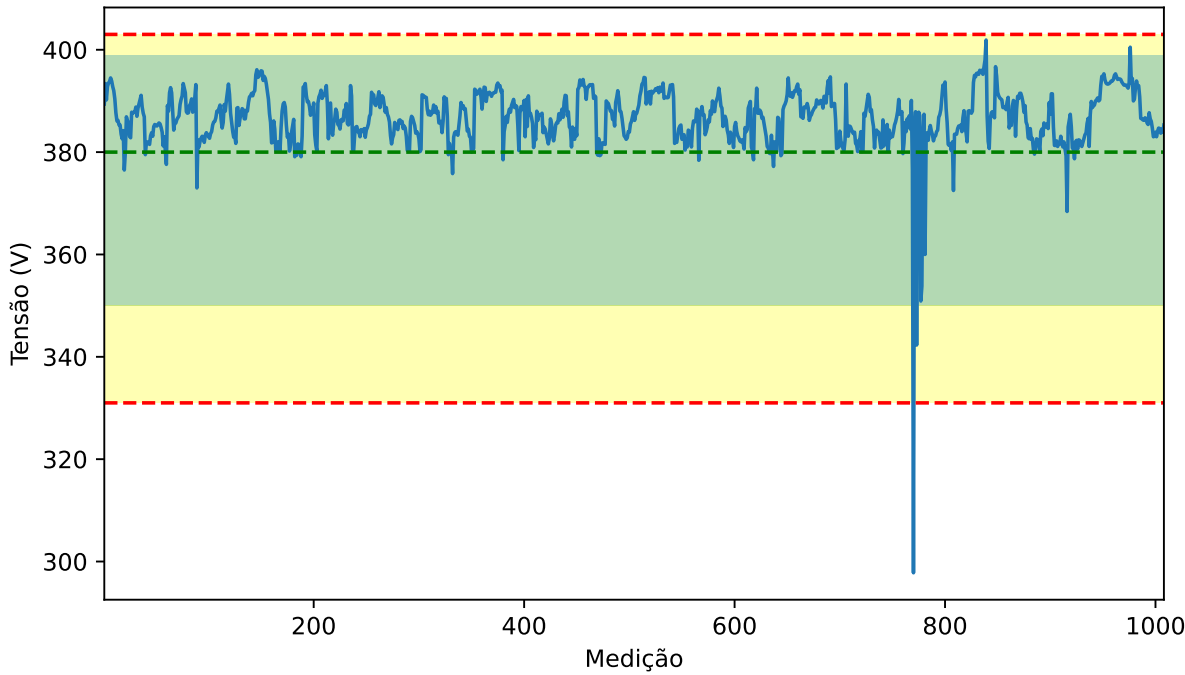
Fonte: Autoria própria.

Figura 53 – Gráfico para tensão V12 de linha mínima



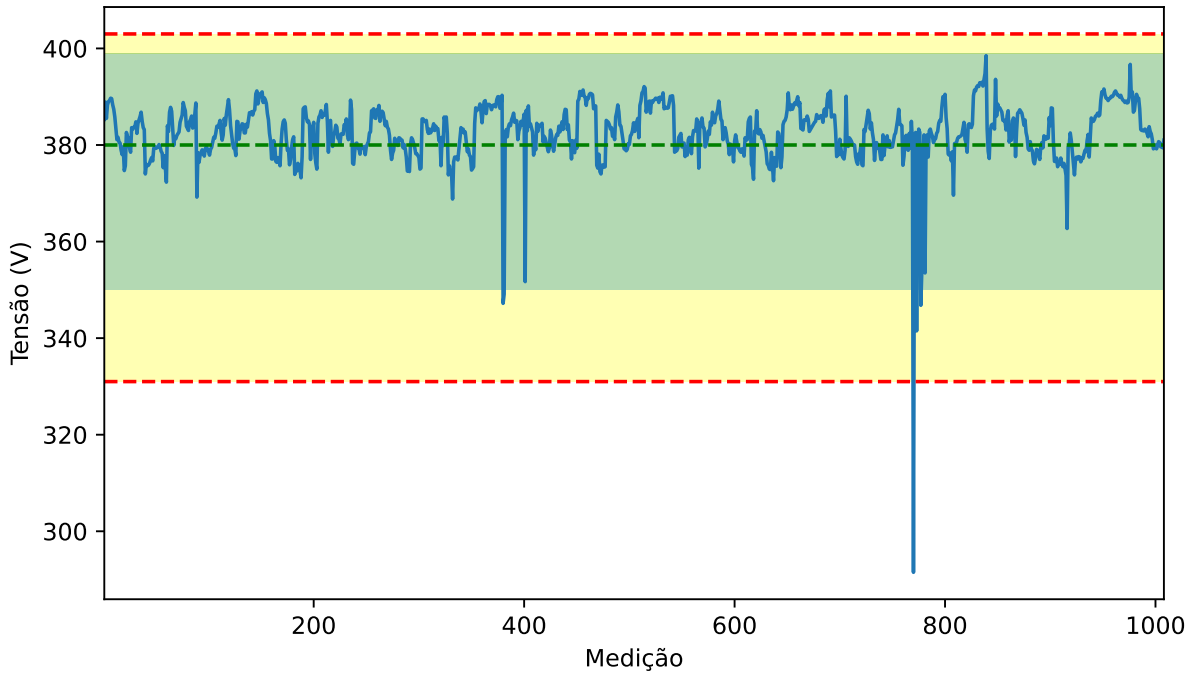
Fonte: Autoria própria.

Figura 54 – Gráfico para tensão V23 de linha mínima



Fonte: Autoria própria.

Figura 55 – Gráfico para tensão V31 de linha mínima



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – RELATÓRIO DE ANÁLISE DE QEE GERADO PELA ROTINA COMPUTACIONAL - AMOSTRA 1



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO RELATÓRIO DE ANÁLISE DE QEE Data do relatório: 05/10/2023 00:17:02

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%

Variação de tensão (fase) - valores máximos

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V2_Max [V]	7.74%	3.00%
DRC	V2_Max [V]	10.12%	0.50%

Variação de tensão (fase) - valores mínimos

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V2_Min [V]	3.57%	3.00%
DRC	V1_Min [V]	1.88%	0.50%

Variação de tensão (linha) - valores médios

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V12_Avg [V]	8.93%	3.00%
DRC	V12_Avg [V]	6.35%	0.50%

Variação de tensão (linha) - valores máximos

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V12_Max [V]	10.42%	3.00%
DRC	V12_Max [V]	11.01%	0.50%

Variação de tensão (linha) - valores mínimos

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
-----------	--------	--------	---------

DRP	V12_Min [V]	4.66%	3.00%
DRC	V12_Min [V]	3.08%	0.50%

Fator de potência - valores médios

Classificação	Quantidade
Adequado	1007
Crítico	1

Fator de potência - valores máximos

Classificação	Quantidade
Adequado	1007
Crítico	1

Fator de potência - valores mínimos

Classificação	Quantidade
Adequado	911
Crítico	97

Distorções harmônicas - V1

Indicador	Obtido	PRODIST
DTT_95%	1.65%	10.00%
DTT_p_95%	0.17%	2.50%
DTT_i_95%	1.63%	7.50%
DTT_3_95%	0.38%	6.50%

Distorções harmônicas - V2

Indicador	Obtido	PRODIST
DTT_95%	1.83%	10.00%
DTT_p_95%	0.19%	2.50%
DTT_i_95%	1.80%	7.50%
DTT_3_95%	0.52%	6.50%

Distorções harmônicas - V3

Indicador	Obtido	PRODIST
DTT_95%	1.80%	10.00%
DTT_p_95%	0.18%	2.50%
DTT_i_95%	1.70%	7.50%
DTT_3_95%	0.71%	6.50%

Desequilíbrio de tensão - valores médios

Indicador	Obtido	PRODIST
FD95%	1.37%	3.00%

Desequilíbrio de tensão - valores máximos

Indicador	Obtido	PRODIST
FD95%	1.35%	3.00%

Desequilíbrio de tensão - valores mínimos

Indicador	Obtido	PRODIST
FD95%	1.41%	3.00%

Flutuação de tensão - V1

Indicador	Obtido	PRODIST
Pst95%	0.38pu	1.00pu

Flutuação de tensão - V2

Indicador	Obtido	PRODIST
Pst95%	0.84pu	1.00pu

Flutuação de tensão - V3

Indicador	Obtido	PRODIST
Pst95%	0.43pu	1.00pu

Variação de frequência - valores médios

Classificação	Quantidade	Porção
Alta	0	0.00%
Adequada	1008	100.00%
Baixa	0	0.00%

Variação de frequência - valores máximos

Classificação	Quantidade	Porção
Alta	6	0.60%
Adequada	1002	99.40%
Baixa	0	0.00%

Variação de frequência - valores mínimos

Classificação	Quantidade	Porção
Alta	0	0.00%
Adequada	1005	99.70%
Baixa	3	0.30%

APÊNDICE D – RELATÓRIO DE ANÁLISE DE QEE GERADO PELA ROTINA COMPUTACIONAL - AMOSTRA 2



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO RELATÓRIO DE ANÁLISE DE QEE Data do relatório: 05/10/2023 00:25:23

Análises

Variação de tensão (fase) - valores médios

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V1_Avg [V]	0.20%	3.00%
DRC	V2_Avg [V]	0.20%	0.50%

Variação de tensão (fase) - valores máximos

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V2_Max [V]	1.98%	3.00%
DRC	V2_Max [V]	0.60%	0.50%

Variação de tensão (fase) - valores mínimos

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V1_Min [V]	0.30%	3.00%
DRC	V2_Min [V]	0.20%	0.50%

Variação de tensão (linha) - valores médios

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V12_Avg [V]	0.69%	3.00%
DRC	V12_Avg [V]	0.20%	0.50%

Variação de tensão (linha) - valores mínimos

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
DRP	V12_Max [V]	2.78%	3.00%
DRC	V12_Max [V]	0.60%	0.50%

Variação de tensão (linha) - valores máximos

Indicador	Tensão	Obtido	PRODIST
-----------	--------	--------	---------

DRP	V31_Min [V]	0.40%	3.00%
DRC	V12_Min [V]	0.20%	0.50%

Distorções harmônicas - V1

Indicador	Obtido	PRODIST
DTT_95%	1.85%	10.00%
DTT_p_95%	0.04%	2.50%
DTT_i_95%	1.84%	7.50%
DTT_3_95%	0.53%	6.50%

Distorções harmônicas - V2

Indicador	Obtido	PRODIST
DTT_95%	2.08%	10.00%
DTT_p_95%	0.03%	2.50%
DTT_i_95%	2.03%	7.50%
DTT_3_95%	0.64%	6.50%

Distorções harmônicas - V3

Indicador	Obtido	PRODIST
DTT_95%	39.70%	10.00%
DTT_p_95%	0.51%	2.50%
DTT_i_95%	34.79%	7.50%
DTT_3_95%	20.14%	6.50%

Desequilíbrio de tensão - valores médios

Indicador	Obtido	PRODIST
FD95%	1.11%	3.00%

Desequilíbrio de tensão - valores máximos

Indicador	Obtido	PRODIST
FD95%	1.11%	3.00%

Desequilíbrio de tensão - valores mínimos

Indicador	Obtido	PRODIST
FD95%	1.15%	3.00%

Flutuação de tensão - V1

Indicador	Obtido	PRODIST
Pst95%	0.26pu	1.00pu

Flutuação de tensão - V2

Indicador	Obtido	PRODIST
Pst95%	0.28pu	1.00pu

Flutuação de tensão - V3

Indicador	Obtido	PRODIST
Pst95%	0.30pu	1.00pu

Variação de frequência - valores médios

Classificação	Quantidade	Porção
Alta	0	0.00%
Adequada	1008	100.00%
Baixa	0	0.00%

Variação de frequência - valores máximos

Classificação	Quantidade	Porção
Alta	10	0.99%
Adequada	998	99.01%
Baixa	0	0.00%

Variação de frequência - valores mínimos

Classificação	Quantidade	Porção
Alta	0	0.00%
Adequada	998	99.01%
Baixa	10	0.99%