CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS NEPOMUCENO

Laís Silva Teixeira
Roberta Araújo Barbosa

MEDIÇÃO E ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA ENTREGUE PELA CONCESSIONÁRIA AO CEFET-MG – CAMPUS NEPOMUCENO

NEPOMUCENO
2024/1

LAÍS SILVA TEIXEIRA
ROBERTA ARAÚJO BARBOSA

MEDIÇÃO E ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA ENTREGUE PELA CONCESSIONÁRIA AO CEFET/MG – CAMPUS NEPOMUCENO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcio Wladimir Santana

NEPOMUCENO
2024/1

LAÍS SILVA TEIXEIRA

ROBERTA ARAÚJO BARBOSA

MEDIÇÃO E ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA ENTREGUE PELA CONCESSIONÁRIA AO CEFET/MG – CAMPUS NEPOMUCENO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Me. Marcio Wladimir Santana

CEFET-MG/Nepomuceno

Prof. Me. Ítalo Arthur João Wilson Silva Meireles

CEFET-MG/Nepomuceno

Prof. Dra. Juliana Vilela Lourençoni Botega

CEFET-MG/Nepomuceno

Dedico este trabalho aos meus pais, Marlene e José Danilo, minha avó Maria Tereza e meu noivo Enderson, por todo apoio e amor incondicional dedicados a mim. A todos os amigos e professores que fizeram parte deste processo, por todos ensinamentos e experiências compartilhadas. Por Laís Silva Teixeira

Dedico este trabalho aos meus pais, Roberto Machado Barbosa e Haiara Araújo Rosa Barbosa, aos meus irmãos e minha avó, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando para a realização desse sonho. Aos professores que levarei para a vida como colegas de profissão e aos amigos que compartilharam comigo as lutas e as vitórias da jornada. Por Roberta Araújo Barbosa

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me guiar e iluminar meu caminho ao longo desta jornada, que não foi fácil. Muitas batalhas e noites em claro, mas sempre em Sua presença.

Aos meus pais, Marlene Nazareth da Silva Teixeira e José Danilo Teixeira, pelo apoio incondicional e amor que sempre me ofereceram, por não medirem esforços para que eu pudesse estudar e me formar. À minha avó, Maria Tereza Salgado Teixeira, por suas palavras de encorajamento e sabedoria, que me inspiraram a seguir em frente e por ser uma das maiores apoiadoras para que esse sonho se tornasse realidade.

Agradeço ao meu noivo, Enderson de Paula Batista, por ser meu parceiro em todos os momentos, sempre me incentivando a dar o meu melhor. Sua compreensão e amor inabalável foram fundamentais para que eu pudesse superar os tantos desafios dessa trajetória.

A todos os professores que contribuíram com seu conhecimento e experiência, e me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

A todos meus amigos de curso, pelo companheirismo e pela troca de experiências, tornando todo processo mais leve.

A minha dupla Roberta Araújo Barbosa, que esteve ao meu lado desde o primeiro dia de aula, sendo sempre meu apoio dentro e fora de sala de aula.

A todos os meus amigos por sempre torcerem por mim e me incentivarem a dar sempre meu melhor.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Márcio, por sua orientação, paciência e ensinamentos valiosos que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. **Por Laís Silva Teixeira**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao bom Deus, por me proporcionar saúde, capacidade e proteção para enfrentar essa longa jornada. Foram muitas batalhas travadas, idas e vindas nas rodovias e noites em claro que só venci na Sua presença.

À toda minha família, que em momento algum mediu esforços para a realização desse sonho. Em especial, ao meu pai Roberto Machado Barbosa que por muitas vezes, nos meus dias mais difíceis, largou o trabalho na lavoura para me levar às aulas; minha mãe, Haiara Araújo Rosa Barbosa, por sempre me incentivar a buscar conhecimento, pois se eu quero, eu faço; à minha avó Áurea Maria, por me proporcionar todo o cuidado, atenção e café, que me deram forças para aguentar até aqui; aos meus irmãos Maria Clara e Douglas que trouxeram a alegria dos meus dias como verdadeiros amigos de caminhada.

Agradeço ao meu atual chefe, Engenheiro Eletricista Robinson de Oliveira, que foi um verdadeiro professor, profissional e ser humano. Às muitas vezes que me entendeu, me aconselhou e me orientou no caminho da engenharia, bem como toda sua família, Caroline, Maria Cecília, Maria Estela, José Pedro e José Marcos, que fizeram meus dias radiantes e me acolheram de uma forma inimaginável.

À atual administração municipal de Coqueiral, que disponibilizou com prontidão o transporte intermunicipal, no qual fui privilegiada todos os dias.

Agradeço aos meus colegas e amigos de faculdade, que fizeram essa jornada mais leve, me proporcionaram risadas e histórias que levarei para sempre em minha memória.

À minha dupla de curso e de vida, Laís Silva Teixeira, que durante todos esses anos foi meu ponto de apoio, dentro e fora da faculdade.

Também aos docentes que amam o que fazem e se dedicam todos os dias para criar bons profissionais, capacitados e humanos; transmitindo conhecimentos que serão carregados junto com tantas boas memórias.

Por fim e não menos importante, ao nosso querido orientador Marcio Wladmir, que sempre fez o melhor por nós e por todos os alunos da Engenharia Elétrica-Nepomuceno como coordenador do curso. Sua capacidade, disponibilidade e atenção para conosco é admirável.

Por Roberta Araújo Barbosa.

"Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ele lança toda a força de sua alma, todo o universo conspiram a seu favor."

-Johann Goethe

"Não te mandei eu? Esforça-te e tem bom ânimo; não pasmes, nem te espantes, porque o Senhor, teu Deus, é contigo, por onde quer que andares."

-Josué 1:9

RESUMO

A crescente sensibilidade dos dispositivos eletrônicos e a evolução das redes elétricas tornam a análise da qualidade de energia elétrica (QEE) um tema de grande relevância, já que, para que os sistemas elétricos funcionem de maneira adequada, sem que ocorra danos aos equipamentos e mantenha a eficiência operacional é necessário um fornecimento de energia estável e confiável. Este trabalho visa medir a qualidade da energia elétrica fornecida pela concessionária ao CEFET de Nepomuceno, analisar os dados e identificar problemas que possam afetar, de alguma maneira os laboratórios e equipamentos da instalação. Foi realizado um estudo operacional do Analisador de Qualidade de Energia Elétrica MAR-722, dispositivo projetado para monitorar e registrar diversos parâmetros da QEE, para entender a capacidade do equipamento e de que forma ele poderia ser utilizado para o desenvolvimento do trabalho. Foram realizadas capturas e análises de dados em ambiente controlado para a verificação da calibragem do equipamento, garantindo o bom funcionamento e confiabilidade dos dados medidos posteriormente. O equipamento apresenta vários módulos de medição, permitindo o monitoramento de todos os parâmetros definidos e a comparação das leituras obtidas com o módulo 8 do PRODIST (Procedimento de Distribuição). Os resultados indicaram divergências na variação de tensão em regime permanente e no desequilíbrio de tensão em relação aos limites definidos pelo Módulo 8. Recomenda-se a realização de estudos futuros para a identificação das causas desses problemas e implementação de soluções para uma melhora na eficiência e confiabilidade do sistema elétrico.

Palavras-chave: Qualidade de Energia Elétrica. Analisador da Qualidade de Energia. PRODIST. Módulo 8.

ABSTRACT

The increasing sensitivity of electronic devices and the evolution of electrical networks make the analysis of power quality (PQ) a topic of great relevance, since, for electrical systems to function properly, without causing damage to equipment and maintaining Operating efficiency requires a stable and reliable power supply. This work aims to measure the quality of the electrical energy supplied by the concessionaire to CEFET in Nepomuceno, analyze the data and identify problems that may affect, in some way, the installation's laboratories and equipment. An operational study was carried out on the MAR-722 Electric Power Quality Analyzer, a device designed to monitor and record several PQ parameters, to understand the equipment's capacity and how it could be used to carry out the work. Data capture and analysis were carried out in a controlled environment to verify the calibration of the equipment, ensuring the proper functioning and reliability of the data subsequently measured. The equipment features several measurement modules, allowing the monitoring of all defined parameters and the comparison of readings obtained with module 8 of PRODIST (Distribution Procedure). The results indicated divergences in the steady-state voltage variation and voltage unbalance in relation to the limits defined by Module 8. It is recommended that future studies be carried out to identify the causes of these problems and implement solutions to improve efficiency and reliability of the electrical system.

Keywords: Electrical Power Quality. Power Quality Analyzer. PRODIST. Module 8.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Crescimento de cargas eletrônicas 17
FIGURA 2. Medidor de qualidade de energia MAR722 19
FIGURA 3. Faixa de tensão em relação à de referência 21
FIGURA 4. Forma de onda típica do efeito de harmônicas 24
FIGURA 5. Sistema trifásico equilibrado 27
FIGURA 6. a) Desequilíbrio de tensão; b) Assimetria de tensão 27
FIGURA 7. Limites da percepção visual para flutuações de tensão associadas a ondas senoidais e quadradas 29
FIGURA 8. Distúrbio Afundamento de tensão (*Voltage Sag)* 33
FIGURA 9. Disturbio elevação de tensão (*Voltage Swell)* 34
FIGURA 10. Distúrbio interrupção de curta duração 35
FIGURA 11. Estudo operacional do MAR722 36
FIGURA 12. Diagrama unifilar do ponto de medição 39
FIGURA 13. Quadro de medição 39
FIGURA 14. Monitor *software* Megabras 41
FIGURA 15. Tensão em regime permanente 42
FIGURA 16. Distribuição da quantidade de medições por nível de tensão [V] 43
FIGURA 17. Fator de potência 44
FIGURA 18. Fator de potência médio 45
FIGURA 19. Tendência harmônica 46
FIGURA 20. Tendência do desequilíbrio 46
FIGURA 21. Tendência *flicker* 47
FIGURA 22. Tendência da frequência 48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1kV (220/127) 22
TABELA 2. Limite para o índice de durativa da transgressão para tensão precária e crítica .. 22
TABELA 3. Terminologia 25
TABELA 4. Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental) 26
TABELA 5. Limite para o indicador de desequilíbrio de tensão 28
TABELA 6. Limites para flutuação de tensão 30
TABELA 7. Classificação das VTCD's 32
TABELA 8. Monitoramento de QEE 38
TABELA 9. Quantidade de medições por nível de tensão [V] 42
TABELA 10. Registro de faixa de tensão por fase 43
TABELA 11. Indicadores calculados e esperados 44
TABELA 12. Valores medidos tendência *flicker* por fase 47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

QEE	Qualidade de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
SEP's	Sistemas Elétricos de Potência
EUA	Estados Unidos da América
IEEE	*Institute of Eletrical and Eletronic Engineers*
IEC	*International Electrotechnical Commssion*
LAN	*Local Area Network*
PC	*Personal Computer*
IP	*Internet Protocol*
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
DIT	Demais Instalações de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema
SDAT	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão
SDBT	Sistema de Distribuição de Baixa Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

Hz	Hertz
Pu	Valores por unidade
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
RMS	Valor eficaz
V	Volt
KV	Quilovolt
THD	*Total Harmonic Distortion*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16
1.1. Objetivos 16
2. REFERENCIAL TEÓRICO 17
2.1. Qualidade de energia 17
2.2. Medidor da qualidade de energia 18
2.2.1. Software Megabras 19
2.3. PRODIST- Módulo 8 19
2.3.1. Fenômenos em regime permanente 20
2.3.2. Fenômenos em regime transitório 31
3. METODOLOGIA 36
3.1. Estudo operacional 36
3.2. Medição 38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 41
4.1. Variações de tensão 41
4.2. Fator de potência 44
4.3. Harmônicos 45
4.4. Desequilíbrio de tensão 46
4.5. Flutuação de tensão 47
4.6. Variação da frequência 47
4.7. Fenômenos em regime transitório 48
5. CONCLUSÃO 49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 50
ANEXO A – RELATÓRIO DE CONFORMIDADE DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE 53
ANEXO B – FATURA DE AGOSTO DE 2024 DO CAMPUS 54

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das décadas, a qualidade de energia elétrica é um tema que vem evoluindo, em resposta ao desenvolvimento das redes elétricas e o aumento significativo da sensibilidade dos dispositivos eletrônicos.

Durante os primeiros passos da eletrificação, ainda no início do século XX, a preocupação principal era o fornecimento de energia elétrica de forma consistente. Nesse período, não havia uma demanda significativa por grandes modificações no fornecimento de energia elétrica, pois muitos distúrbios não eram facilmente perceptíveis.

Com o tempo, o crescente uso de equipamentos elétricos e eletrônicos sensíveis às variações da rede trouxe à tona preocupações significativas com a QEE. A estabilidade da tensão tornou-se uma questão crítica, levando ao desenvolvimento dos primeiros dispositivos de filtragem para proteger os aparelhos de surtos e ruídos.

A análise do comportamento real da rede elétrica, a compreensão sobre seu funcionamento e a verificação de seus parâmetros são importantes para constante melhoria e maior eficiência da relação fornecimento e consumo de energia. (BEVILAQUA, 2014).

O CEFET-MG, sendo referência em laboratórios, de eletrônica de potência a máquinas CC e CA, tem a necessidade de um sistema equilibrado e dentro dos padrões definidos pelo PRODIST Módulo 8. Diante disso, se faz necessário o estudo da Qualidade de Energia Elétrica entregue pela Concessionária ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nepomuceno.

1.1. Objetivos

Analisar a QEE entregue ao Campus Nepomuceno a fim de identificar problemáticas que possam comprometer o desempenho dos equipamentos, bem como guardar-se de perdas desnecessárias e aumentar a vida útil, para assim, evitar possíveis manutenções e respectivos custos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

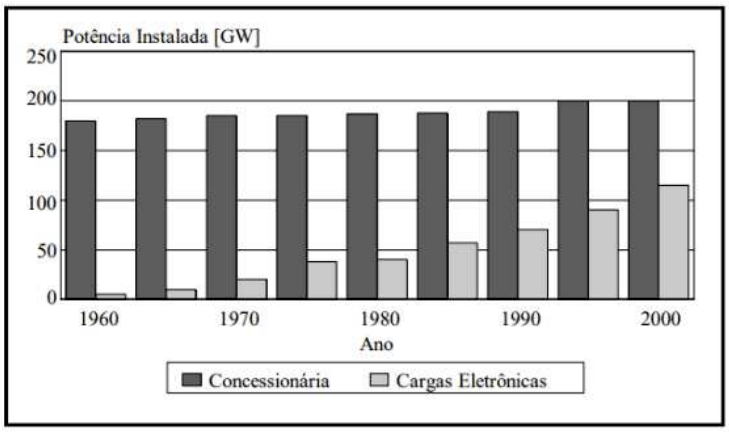
2.1. Qualidade de energia

A percepção sobre a importância da qualidade da energia elétrica evoluiu significativamente ao longo dos anos. Enquanto no passado os problemas relacionados à energia eram menos evidentes devido à simplicidade dos equipamentos, a complexidade crescente dos sistemas eletrônicos modernos tornou a qualidade da energia um fator crucial para o desempenho e a confiabilidade de diversos processos. A crescente adoção de tecnologias de eletrônica de potência, por sua vez, impulsionou a necessidade de novas soluções para garantir a qualidade da energia.

O que se justifica, principalmente, pelos equipamentos modernos, com controles microprocessados e eletrônica de potência, mais sensíveis a variações na qualidade da energia, tornando-os vulneráveis a distúrbios que antes não os afetam significativamente o sistema. A busca por maior eficiência nos sistemas elétricos levou ao uso de equipamentos de alta eficiência, acionamentos eletrônicos e bancos de capacitores, aumentando os níveis de harmônicas nos SEP's e gerando preocupação com seus efeitos futuros. Consumidores, mais informados sobre a "qualidade da energia" e os efeitos de interrupções e descargas elétricas, pressionam as concessionárias por melhorias. Além disso, o aumento do uso de linhas de comunicação de dados em todos os setores exige operações ininterruptas, alinhadas às tendências de redes elétricas inteligentes (*smart grids*). (PAULILLO et al., 2014)

O levantamento feito nos EUA, mostra o crescimento das cargas eletrônicas em relação à potência instalada de um sistema típico, do ano de 1960 ao ano 2000 (OLIVEIRA, 2000)

FIGURA 1. Crescimento de cargas eletrônicas



Fonte: OLIVEIRA, 2000.

A qualidade de energia é baseada em fornecer e estabelecer alimentação de um equipamento elétrico de forma adequada ao seu funcionamento (IEEE,1995), caracterizar a eletricidade em um dado ponto do sistema elétrico, em relação a um conjunto de parâmetros técnicos de referência (IEC, 1991) e por quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores, da distribuição à qualidade de atendimento. (DECKMANN et al., 2017).

A qualidade do atendimento inclui dois aspectos principais: o atendimento comercial, que cuida das interações diárias com a empresa, e o atendimento de emergência, que entra em ação quando há problemas na rede elétrica. Em ambos os casos, a rapidez, a eficiência e a resolução das nossas demandas são fundamentais para garantir um serviço de qualidade (PAULILLO, 2013).

A qualidade do serviço é avaliada pela continuidade no fornecimento de energia elétrica. Portanto, em um cenário ideal, a qualidade do serviço deveria garantir uma disponibilidade ininterrupta e uma oferta ilimitada de energia elétrica (PAULILLO, 2013; GESTAL, 2022)

2.2. Medidor da qualidade de energia

Segundo a Megabras, o analisador de qualidade de energia MAR722 é um equipamento compacto, robusto e de fácil manuseio, projetado para medição e diagnóstico da qualidade da energia em sistemas de tensão monofásicos, bifásicos e trifásicos.

De acordo com seu manual, foi desenvolvido com base na norma IEC 61010-1. A norma IEC 61010 trata da segurança de equipamentos de inspeção e medição, possui CAT III 1000 V, CAT IV 600 V, sendo:

● CAT III: Categoria de medição III corresponde a medições realizadas em instalações de edificações. Exemplo: Medição de painéis de distribuição, cabeamento etc.

● CAT IV: Categoria de medição IV corresponde a medições realizadas em pontos onde se faz a conexão de baixa tensão com a rede de energia. Exemplo: medição em dispositivos de proteção contra sobre tensão.

FIGURA 2. Medidor de qualidade de energia MAR722

Fonte: Megabras, 2017

2.2.1. Software Megabras

De acordo com o Manual do Analisador MAR77 (MEGABRAS,2017), este é equipado com uma interface LAN para comunicação com um computador. Com o *software* fornecido, é possível fazer o controle remoto do analisador através de um PC. Além disso, com o mesmo software é possível também verificar os dados e capturas de tela copiados de um *pendrive*. Na interface "Preferência de Usuário", basta definir o eth0 do analisador corretamente antes de conectar o analisador à internet com um cabo de rede. Em seguida, basta executar o software do computador, introduzir o endereço IP do analisador para estabelecer a ligação, e será apresentada uma interface de operação que verifica o analisador para uma ligação bem-sucedida.

2.3. PRODIST- Módulo 8

O PRODIST estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Esses procedimentos normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e ao desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, garantindo uma operação segura, eficiente e confiável, além de promover o acesso não discriminatório entre agentes. O PRODIST também assegura o fluxo de informações adequadas à ANEEL, e define os requisitos técnicos para o intercâmbio de informações entre os agentes setoriais e entre estes e os consumidores, complementando de forma harmônica os procedimentos de rede na interface com a rede básica. (ANEEL, 2018; ENERGUÊS,2021)

Possui aplicabilidade sobre todas as redes e linhas de distribuição de energia elétrica com tensão inferior a 230kV, incluindo baixa, média e alta tensão. Se aplica às concessionárias,

permissionárias e autorizadas de geração distribuída e de distribuição de energia elétrica; aos consumidores conectados à rede em qualquer classe de tensão; aos agentes importadores ou exportadores de energia elétrica conectados ao sistema de distribuição; às transmissoras responsáveis por DIT; e o ONS. (ANEEL, 2021)

O PRODIST é dividido em módulos que regulamentam as atividades da distribuição de energia elétrica no Brasil. No Módulo 8 foram estabelecidos os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica na distribuição, no que se refere à qualidade comercial. São apresentados valores de referência que servem de parâmetros sobre o fornecimento ou consumo da energia elétrica, que permitem analisar a QEE fornecida aos consumidores. (ANEEL, 2021)

2.3.1. Fenômenos em regime permanente

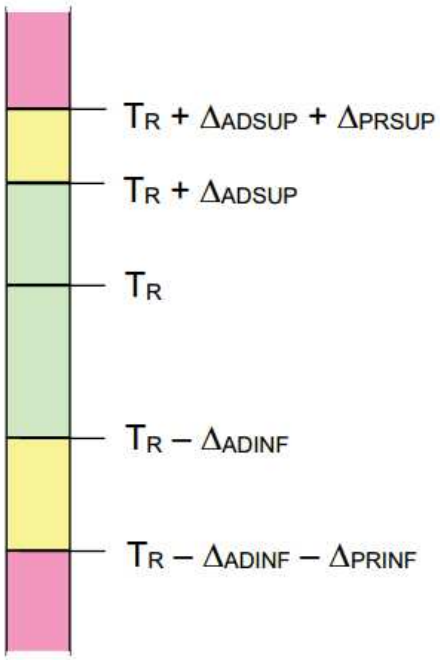
O regime permanente em circuitos elétricos é uma condição em que todas as variáveis do circuito (como corrente e tensão) se estabilizam e não mudam mais com o tempo. Isso ocorre após o circuito ter passado por um período transitório, que é quando as variáveis ainda estão mudando devido a uma alteração inicial, como a aplicação de uma tensão ou corrente. (JÚNIOR, 2003)

2.3.1.1. Variações de tensão

O termo “conformidade de tensão elétrica" refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos. (ANEEL,2021)

A tensão deve ser associada e classificada segundo as faixas de tensão em torno da faixa de referência (TR) conforme a Figura 3.

FIGURA 3. Faixa de tensão em relação à de referência



Fonte: ANEEL, 2021.

Sendo:

a) Tensão de Referência (T_R);
b) Faixa Adequada de Tensão ($T_R - \Delta_{ADINF}$, $T_R + \Delta_{ADSUP}$);
c) Faixas Precárias de Tensão ($T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$);
d) Faixas Críticas de Tensão ($> T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $< T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRSUP}$).

O conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deve consistir em 1008 (mil e oito) leituras válidas, registradas em intervalos consecutivos de 10 minutos (período de integralização), que se refere a 168 horas. Em caso de exclusão de dados, leituras adicionais devem ser realizadas em intervalos consecutivos até que se atinjam as 1008 leituras. (ANEEL,2021)

A Tabela 1, mostra os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127) estabelecidos pelo PRODIST no Anexo 8. A, sendo TL a tensão de leitura obtida nas medições.

TABELA 1. Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1kV (220/127)

Tensão de Atendimento (TA)	**Faixa de Variação da Tensão de Leitura [V]**
Adequada	(202≤TL≤231) / (117≤TL≤133)
Precária	(191≤TL<202) ou (231<TL≤233) / (110≤TL<117) ou (133<TL≤135)
Crítica	(TL<191 ou TL>233) / (TL<110 ou TL>135)

Fonte: ANEEL,2021.

Após a obtenção do conjunto válido, seja em medições provenientes de reclamações ou amostras, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e para tensão crítica (DRC) conforme as equações 1 e 2:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} * 100[\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} * 100[\%] \quad (2)$$

sendo:

a) nlp : o número de medições na faixa de classificação precária;
b) nlc : o número de medições na faixa de classificação crítica.

Os indicadores devem estar dentro dos limites apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. Limite para o índice de durativa da transgressão para tensão precária e crítica

Indicadores	**Limite [%]**
DRP	3,00
DRC	0,50

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

A distribuidora deve compensar os consumidores que foram submetidos a tensões fora dos limites estabelecidos. Para o cálculo da compensação deve ser usada a Expressão 3.

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

k_1 = 0, se $DRP \leq DRP_{limite}$;

k_1= 3, se $DRP > DRP_{limite}$;

k_2 = 0, se $DRC \leq DRC_{limite}$;

k_2 = 7, para consumidores atendidos em Baixa Tensão, se $DRC > DRC_{limite}$;

k_2 = 5, para consumidores atendidos em Média Tensão, $DRC > DRC_{limite}$;

k_2 = 3, para consumidores atendidos em Alta Tensão, $DRC > DRC_{limite}$;

DRP= valor do DRP expresso em %, apurado na última medição;

DRP_{limite}= 3 %;

DRC = valor do DRC expresso em %, apurado na última medição;

DRC_{limite} = 0,5 %;

$EUSD$ = valor do encargo de uso do sistema de distribuição correspondente ao mês de referência da última medição.

2.3.1.2. Fator de potência

O fator de potência (FP) é uma relação entre a potência útil para realizar trabalho real (potência ativa) à potência fornecida por uma concessionária (potência aparente), (POMLIO, 2007) ou seja:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (4)$$

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (5)$$

A relação do fator de potência mede a porcentagem de potência gasta para o uso pretendido. O fator de potência varia de zero a um. Uma carga com fator de potência de 0,9 atrasado indica que a carga pode efetivamente utilizar 90% da potência aparente fornecida e convertê-la para realizar trabalho útil. (DUGAN, 2004)

O controle do fator de potência deve ser efetuado por medição permanente e obrigatória no caso de unidades consumidoras atendidas pelo SDMT e SDAT e nas conexões entre distribuidoras, ou por medição individual permanente e facultativa nos casos de unidades consumidoras do Grupo B com instalações conectadas pelo SDBT, observando do disposto em regulamentação. (ANEEL, 2021)

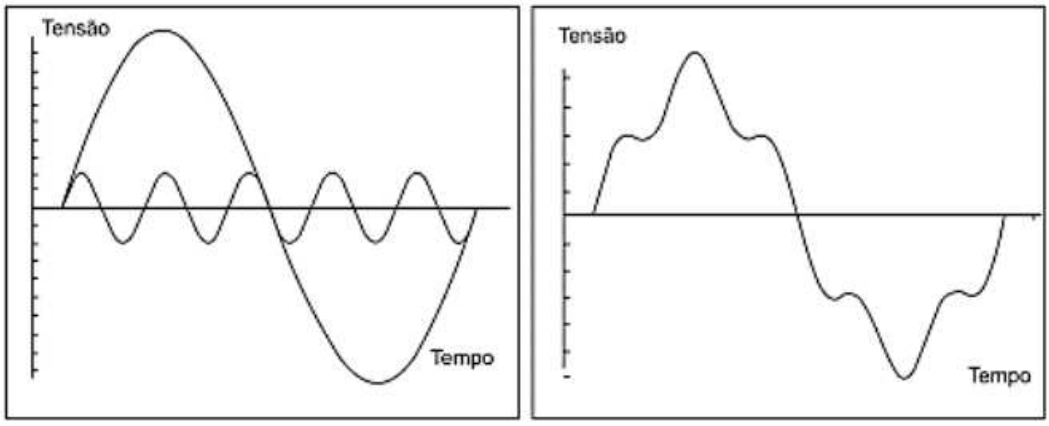
Para unidade consumidora acessante da rede básica os padrões deverão seguir o determinado no Procedimento de Rede. (ANEEL, 2021) O fator de potência de referência FP, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido o valor de 0,92 para a unidade consumidora do grupo A." (CEMIG- ND 3.1, 2023; ANEEL, 2021). A distribuidora não pode cobrar a unidade consumidora do grupo B, que não tem fator de potência de referência, pelo consumo de energia elétrica reativa excedente. (ANEEL, 2021)

2.3.1.3. Harmônicos

As distorções harmônicas são sinais senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental do sistema que causam deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. (MERKLE,2018; ANEEL,2021).

A Figura 4 apresenta uma forma de onda da frequência fundamental com efeito de harmônicas.

FIGURA 4. Forma de onda típica do efeito de harmônicas



Fonte: ALDABÓ, 2001.

A Tabela 3 sintetiza a terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas.

TABELA 3. Terminologia

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h_{max}
Ordem harmônica mínima	h_{min}
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT95\%$
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_p95\%$
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_i95\%$
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_3 95\%$

Fonte: ANEEL, 2021.

As expressões para o cálculo das grandezas $DIT_h\%$, $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_i\%$ e $DTT_3\%$ são:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} * 100 \tag{6}$$

$$DTT\% = \sqrt{\frac{\Sigma_{h=2}^{h_{max}} * V_h^2}{V_1}} * 100[\%] \tag{7}$$

sendo:

$h =$ todas as ordens harmônicas de 2 até h_{max};

$h_{max} =$ ordem harmônica máxima, conforme classe do equipamento de medição utilizado (Classe A ou S);

$V_h =$ tensão harmônica de ordem h;

V_i = Tensão fundamental medida.

A Equação 6 é utilizada como base para o cálculo dos demais indicadores, cujos parâmetros variam de acordo com o caso, sendo diferentes para números pares, ímpares, múltiplos de 3 ou não múltiplos de 3, entre outros.

Os limites de distorção harmônica total estão descritos na tabela 4 e correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

TABELA 4. Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	**Tensão nominal**		
	$V_n \leq$ 1,0 kV	1,0 kV $< V_n <$ 69 kV	69 kV $\leq V_n \leq$ 230 kV
$DTT95\%$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_p95\%$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_i95\%$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_3 95\%$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (ANEEL, 2021)

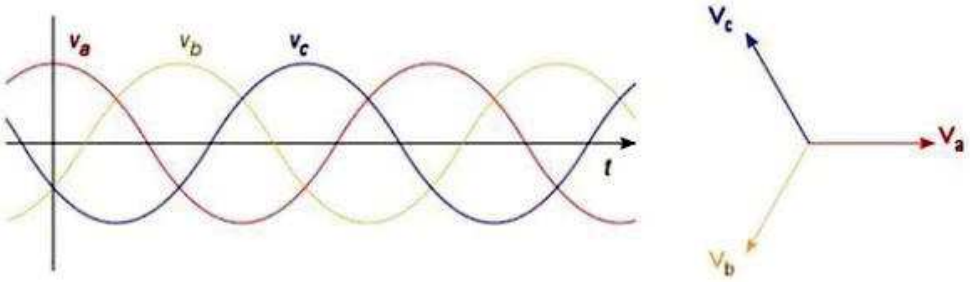
2.3.1.4. Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio em sistemas elétricos trifásicos ocorre quando as três fases apresentam diferentes valores de tensão ou defasagens angulares. Este desequilíbrio é definido como o desvio máximo das tensões ou correntes trifásicas em relação à média, expresso em porcentagem. As causas comuns incluem cargas monofásicas mal distribuídas e a queima de fusíveis em bancos de capacitores trifásicos. Segundo os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da ANEEL, o desequilíbrio é analisado através do fator de desequilíbrio, que relaciona as componentes de sequência negativa e positiva da tensão (PAULILLO, 2013).

As Figuras 5 e 6 ilustram, respectivamente, um sistema trifásico equilibrado e um sistema trifásico desequilibrado, respectivamente. O caso apresentado na Figura 6 expõe a

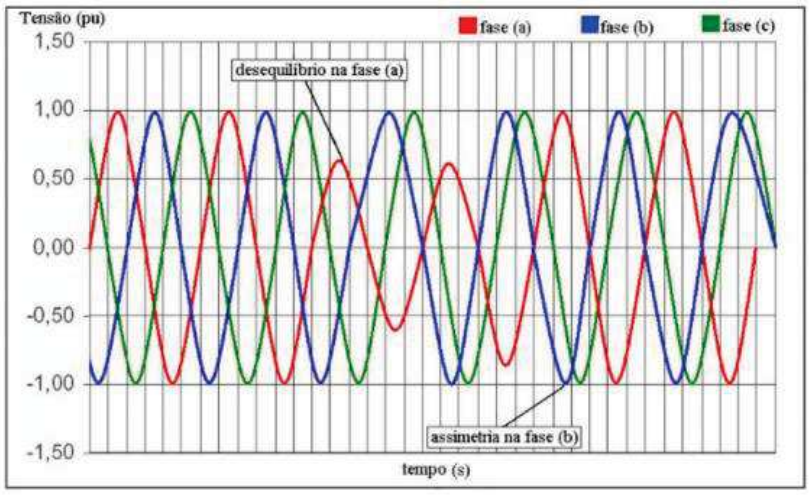
desequilíbrio na amplitude da fase A e assimetria da fase B causada pelos diferentes valores das defasagens angulares.

FIGURA 5. Sistema trifásico equilibrado



Fonte: GUIMARÃES, 2020.

FIGURA 6. a) Desequilíbrio de tensão; b) Assimetria de tensão



Fonte: XAVIER, 2005.

Segundo o Módulo 8 do PRODIST, expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão (FD%) é:

$$FD\% = \frac{V-}{V+} 100 \tag{8}$$

onde,

$FD\%$= fator de desequilíbrio de tensão;

$V-$ = magnitude da tensão eficaz de sequência negativa na frequência fundamental;

$V+$ = magnitude da tensão eficaz de sequência positiva na frequência fundamental;

O parâmetro utilizado para avaliar o desequilíbrio de tensão em relação aos limites estabelecidos é o $FD95\%$. Este fator representa o percentual de desequilíbrio de tensão ($FD\%$) que foi ultrapassado em apenas 5% das 1.008 medições consideradas válidas. A tabela a seguir apresenta os limites correspondentes para o indicador de desequilíbrio de tensão $FD95\%$.

TABELA 5. Limite para o indicador de desequilíbrio de tensão

Indicador	**Tensão nominal**	
	Vn ≤ 1,0 kV	**1 kV < Vn < 230 kV**
FD95%	3,0%	2,0%

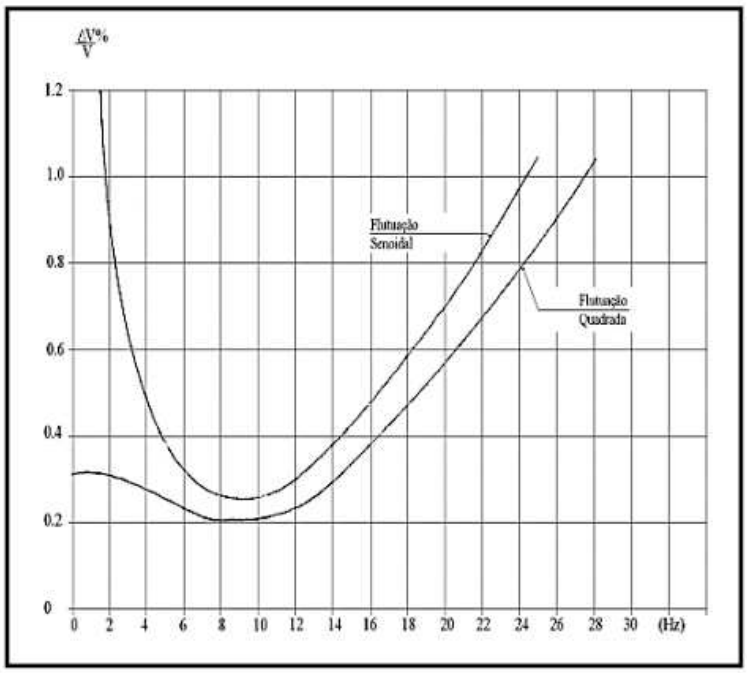
Fonte: ANEEL, 2021.

2.3.1.5. Flutuação de tensão

De acordo com Hanzelka, 2006 e Deckmann, 2017, a flutuação de tensão são variações regulares ou irregulares na amplitude da tensão ou no valor eficaz, que pode causar o efeito de cintilação, também chamado de *flicker*, que é a impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso das lâmpadas.

A intensidade do efeito *flicker* está associada aos seguintes fatores: amplitude das oscilações; frequência da moduladora; e duração do distúrbio ou ciclo de operação da carga perturbadora. A Figura 7, representa os limites da percepção visual para flutuações de tensão variações da ordem de 0,25% da tensão nominal, sendo consideradas em baixas frequências de 1 a 15 Hz. Contudo, para as variações graduais, ocorre uma acomodação visual, provocando um nível de irritação visual tolerável para o ser humano (OLIVEIRA, 2000).

FIGURA 7. Limites da percepção visual para flutuações de tensão associadas a ondas senoidais e quadradas



Fonte: Oliveira, 2000.

De acordo com Paulillo (2013) as causas do *flicker*, sejam elas repetitivas, esporádicas ou aleatórias estão relacionadas a alterações rápidas nas potências ativas e reativas das cargas elétricas. Os efeitos das flutuações de tensão basicamente são:

• Oscilações de potência e torque de motores elétricos;

• Interferência na instrumentação eletrônica, equipamentos de processamento de dados e de controle de processos industriais;

• Interferência em aparelhos residenciais, tais como: vídeos, relógios digitais e TVs;

• Redução da velocidade de fusão e da produtividade de fornos a arco;

• Falhas ou comprometimento do processo de soldagem;

• Desconforto visual provocado pela cintilação luminosa das lâmpadas, principalmente das incandescentes, também conhecido como efeito *flicker*.

Os indicadores de flutuação de tensão de acordo com o PRODIST são (ANEEL, 2021):

• Pst representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 minutos.

• Plt representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 horas.

• $Pst95\%$ representa o valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas.

A equação para o cálculo do indicador Pst é:

$$Pst = \sqrt{0{,}0314P_{0,1} + 0{,}0525P_1 + 0{,}0657P_3 + 0{,}28P_{10} + 0{,}08P_{50}} \quad (9)$$

Em que: Pi (i = 0,1; 1; 3; 10; 50) corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante i% do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (International Electrotechnical Commission): IEC 61000-4-15. Flickermeter – Functional and Design Specifications.

O Plt corresponde a um valor representativo de 12 amostras consecutivas de Pst, como estabelecido pela equação a seguir:

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12}\sum_{I=1}^{12}(P_{sti})^3} \quad (10)$$

A Tabela 6 fornece os limites a serem utilizados para a avaliação do desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão.

TABELA 6. Limites para flutuação de tensão

Indicador	**Tensão nominal (Vn)**		
	Vn < 2,3 Kv	$2{,}3 \leq Vn < 69\ kV$	69 kV < Vn < 230 kV
P_{st}**95%**	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: ANEEL,2021.

Estes limites representam o valor máximo desejável que deve ser observado no sistema de distribuição.

2.3.1.6. Variação de frequência

A variação da frequência pode ser definida como o desvio da frequência fundamental do sistema, a partir do valor nominal determinado (DUGAN et al, 2004).

O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas a ele devem, em condições normais de operação e regime permanente, manter a frequência entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Em caso de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem assegurar que a frequência retorne à faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz dentro de 30 (trinta) segundos após a ocorrência, permitindo a recuperação do equilíbrio entre carga e geração. (ANEEL,2021). Se for necessário interromper a geração ou a carga para restabelecer o equilíbrio entre carga e geração durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência:

a) não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
b) pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos;
c) pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 (cinco) segundos. (ANEEL,2021).

2.3.2. Fenômenos em regime transitório

Os fenômenos em regime transitório são fenômenos de curtíssima duração, podendo ser do tipo impulsivo ou oscilatório. O termo transitório é utilizado na análise das variações em sistemas de energia para descrever eventos momentâneos e indesejáveis. Eles referem-se às respostas ou manifestações elétricas, locais ou nas proximidades, que surgem devido a mudanças súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica (PAULILLO,2013).

2.3.2.1. Variações de tensão de curta duração – VTCD

As Variações Transitórias de Curta Duração (VTCD) são eventos de interrupção, afundamento e elevação de tensão com duração de ½ ciclo a um minuto ou ainda pode ocorrer uma completa perda da tensão. Há uma dificuldade de classificação para os transitórios com duração menor que um ciclo da tensão fundamental da rede elétrica, os surtos e transitórios rápidos de tensão (DECKMANN et al., 2017).

Segundo a ANEEL, são classificadas de acordo com a Tabela 7.

TABELA 7. Classificação das VTCD's

Classificação	**Denominação**	**Duração da Variação**	**Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência**
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: ANEEL,2021.

2.3.2.1.1. Afundamento de tensão

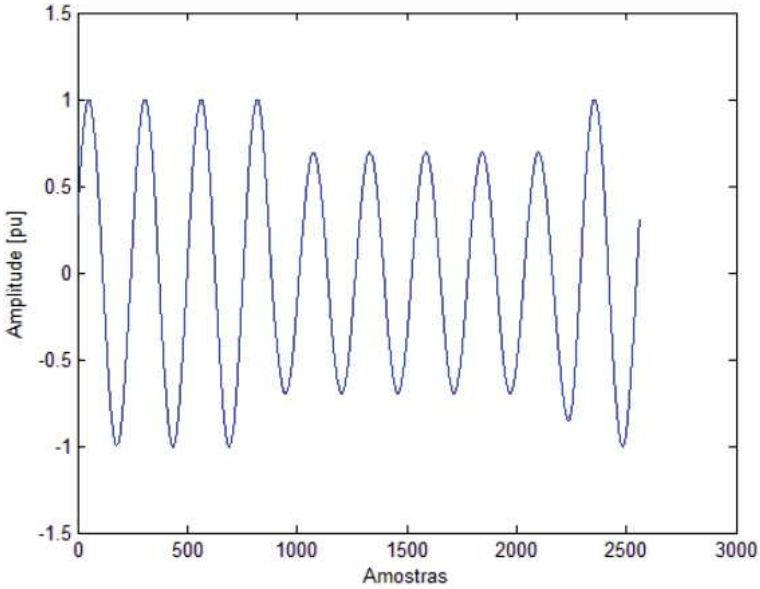
O afundamento de tensão é uma diminuição na magnitude de tensão de fornecimento para um valor abaixo do valor nominal, seguido pelo seu retorno em um curto período. Quando esses eventos ocorrem os equipamentos conectados à rede podem funcionar de forma inadequada ou sair de operação, a interrupção do funcionamento dos equipamentos pode

comprometer tanto a segurança quanto a produção. (MELHORN, 1998 et al.; ANDRADE JUNIOR, 2011)

Evento em que o valor eficaz da tensão do sistema se reduz para valores abaixo de 90% e acima ou igual a 10% da tensão nominal de operação, durante um intervalo superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos.

Os eventos de afundamento de tensão, conhecidos também como *Voltage Sa*g ou *Dips* estão associados, principalmente, a curtos-circuitos ocorridos nas redes de distribuição, mas, pode também ser causado pela energização de grandes cargas, partida de grandes motores e pela corrente *inrush* de um transformador (OLIVEIRA, 2000). A Figura 8, mostra o distúrbio:

FIGURA 8. Distúrbio Afundamento de tensão (*Voltage Sag)*



Fonte: SANTANA, 2017.

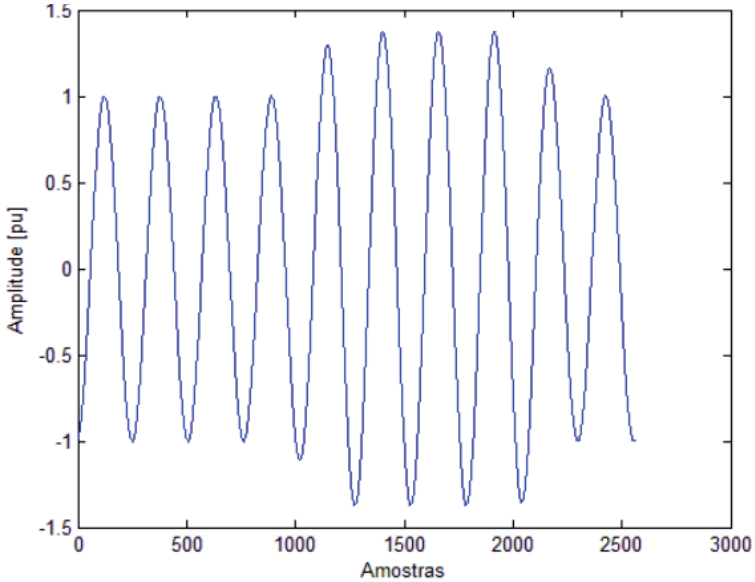
Alguns estudos mostram que a grande maioria dos afundamentos é causada pela circulação da corrente de curto-circuito através das impedâncias de linhas de transmissão e transformadores, enquanto não ocorre a atuação dos equipamentos responsáveis pela proteção ou a completa eliminação do defeito.

2.3.2.1.2. Elevação de tensão

As elevações de tensão, também conhecidas como *Voltage Swell*, estão relacionadas com as condições de falta no sistema, principalmente ao curto-circuito fase-terra, pois nestas condições as fases não defeituosas experimentam uma elevação de tensão. Além disso, podem

estar associadas à saída de grandes blocos de cargas ou à energização de grandes bancos de capacitores, porém, com uma incidência pequena se comparada com as sobretensões provenientes de faltas fase-terra nas redes de transmissão e distribuição (OLIVEIRA,2000). A Figura 9 mostra um *Swell*:

FIGURA 9. Disturbio elevação de tensão (*Voltage Swell)*

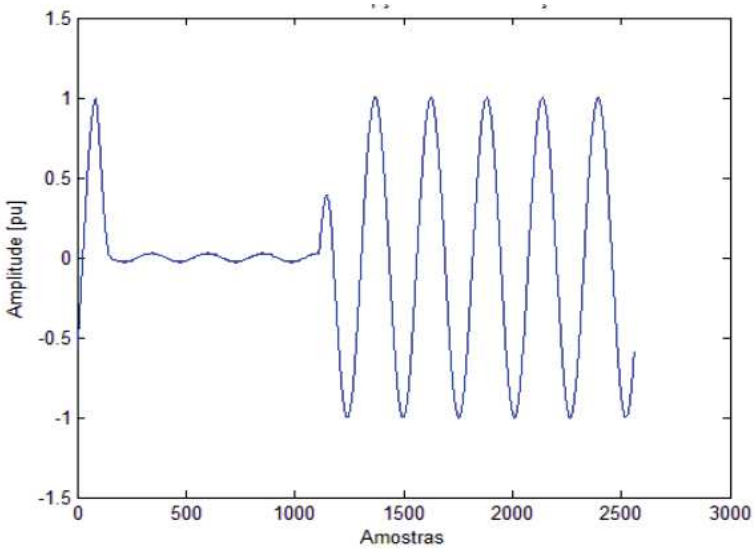


Fonte: SANTANA, 2017.

2.3.2.1.3. Interrupção de curta duração

A interrupção de curta duração ocorre quando o fornecimento de tensão decresce em um valor menor que 0,1 pu, sendo consequência de falhas nos equipamentos, efeito retardado em dispositivos de proteção, defeitos nos sistemas de energia ou mal funcionamento dos sistemas de controle. Quando ocorre, tem duração de meio ciclo até 3 minutos, dependendo da situação (DUGAN,2004; ANEEL,2021; ALDABÓ, 2001). A Figura 10 mostra um exemplo de interrupção momentânea:

FIGURA 10. Distúrbio interrupção de curta duração



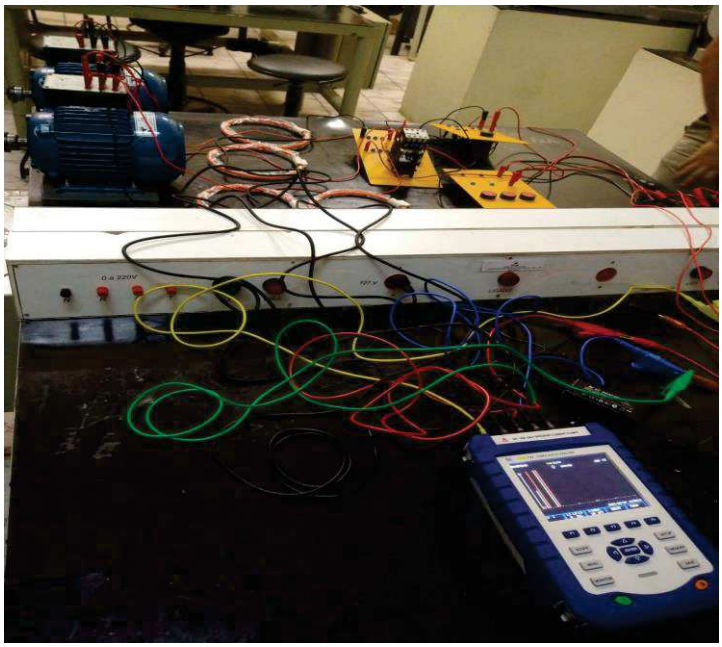
Fonte: SANTANA, 2017.

3. METODOLOGIA

3.1. Estudo operacional

O processo de medições foi iniciado após a realização de um estudo operacional do Analisador de Qualidade de Energia Elétrica MAR-722. Foi utilizado o ensaio da partida de motores de indução trifásicos (MIT), conforme a Figura 11, onde monitorava-se a leitura dos parâmetros fornecidos pelo MAR722, além de simular variações de tensão nesses equipamentos com intuito de verificar se eram registrados pelo analisador. Esses testes são importantes para verificar o funcionamento do equipamento.

FIGURA 11. Estudo operacional do MAR722



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

Antes que o procedimento de medição seja iniciado, é necessário escolher a forma de ligação que o analisador será conectado com a rede ou dispositivo, essas formas de ligação são fornecidas no próprio analisador. Examinando o manual, foi possível descobrir que o equipamento fornece diferentes módulos de medição, sendo eles:

• Monitor de qualidade de energia: Contém Tensão RMS, harmônicos, flicker, rápida mudança de tensão, dips, swells, interrupção, desequilíbrio e frequência;

• Tela diagrama fasorial: Relação de fase entre tensões e correntes é mostrada em um diagrama vetorial;

• Tela de forma de onda: Mostra o valor RMS das formas de onda (tensão ou corrente), a frequência medida;

• Tela de tendência: Esta tela mostra o curso ao longo do tempo de valores de medição da tabela, a Tendência (Dips & Swells) é criada gradualmente a partir da direita da tela.

• Tela de tabela: Esta tela fornece uma visão geral instantânea de valores de medição numéricas importantes de tensão, corrente e frequência;

• Função MENU: Na tecla MENU, são apresentados os seguintes modos de medição:

i- Tensão, corrente e frequência: exibe valores numéricos de tensão, corrente, frequência e fator de forma de onda;

ii- Dips & Swells: exibe tendências de atualizações rápidas de tensão, corrente ao longo do tempo e grava os eventos que excedem o limite;

iii- Harmônicos: exibe em gráfico de barras e tabela, tensão, corrente harmônico, Inter harmônico, THD (Total Harmonic Distortion) componente CC;

iv- Potência e energia: exibe valores numéricos de potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, fator de potência de deslocamento, tensão, corrente, uso de energia.

v- Flicker: exibe tendências de flicker instantâneo ao longo do tempo, também valores numéricos de flicker de tempo curto (1 min) e flicker de tempo longo (10 min);

vi- Desbalanceamento: valores numéricos de Tensão, porcentagem de desbalanceamento negativo de corrente e porcentagem de desbalanceamento zero, tensão fundamental, componente de corrente e ângulo de fase;

vii- Transiente: formas de ondas de corrente e tensão, grava eventos que excedem o limite;

viii- Partida de motores: grava eventos que excedem o limite, exemplo, corrente de partida;

ix- Registro: Todas as leituras selecionadas.

Para este trabalho, foram utilizadas as funções de medição “monitor de qualidade de energia” durante um período de 7 dias para verificação da tensão eficaz, distorção harmônica total de tensão, frequência e tensão harmônica; e a função “potência e energia” durante os 7 dias posteriores para a apuração do fator de potência.

Para os indicadores individuais, de acordo com o módulo 8 do PRODIST, deve-se considerar o registro de 1.008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, equivalente a 168 horas, portanto a medição de todos os parâmetros aconteceu num período de 14 dias, ou seja, 336 horas.

A Tabela 8 apresenta os aspectos do monitoramento de qualidade de energia elétrica.

TABELA 8. Monitoramento de QEE

Parâmetro	Gráficos de Barras disponíveis	Limites	Média de Intervalo
RMS	3, um para cada fase	Probabilidade 100%: limites superior e inferior Probabilidade x%: limites superior e inferior	10 minutos
Harmônicos	3, um para cada fase	Probabilidade 100%: limite superior Probabilidade x%: limite superior	10 minutos
Flicker	3, um para cada fase	Probabilidade 100%: limite superior Probabilidade x%: limite superior	2 horas
Dips / Interrupções / Mudanças rápidas de Tensão / Swells	4, um para cada parâmetro abrangendo todas as 3 fases	Número permitido de eventos	Fundamentado em ½ ciclo RMS
Desbalanceamento	1, abrangendo todas as 3 fases	Probabilidade 100%: limite superior Probabilidade x%: limite superior	10 minutos
Frequência	1, medido na entrada de tensão de referência A / L1	Probabilidade 100%: limites superior e inferior Probabilidade x%: limites superior e inferior	10 segundos

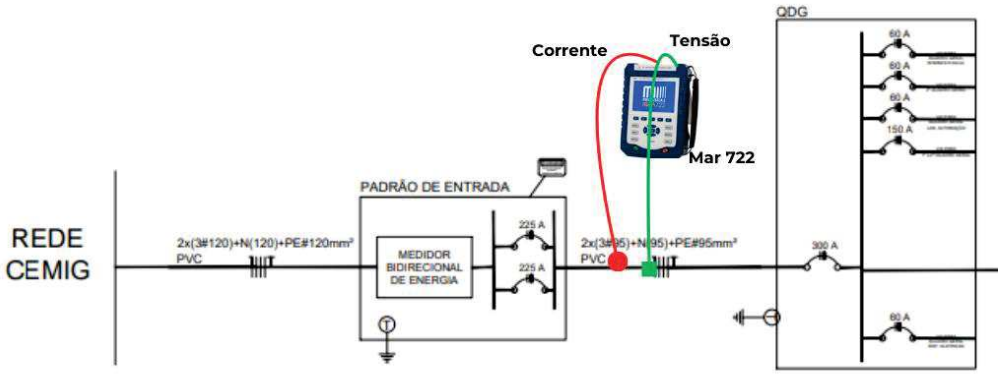
Fonte: Manual MAR722.

Além disso, o analisador MAR-722 deve ser configurado na rede de energia de acordo com as informações da rede de energia, sendo: tensão nominal 127V e frequência da rede elétrica 60 Hz.

3.2. Medição

O ponto escolhido para a medição foi a entrada da concessionária, conforme mostrado na Figura 12.

FIGURA 12. Diagrama unifilar do ponto de medição



Fonte: Adaptado pelas autoras, 2023.

A Figura 13 apresenta o local onde foram realizadas as medições.

FIGURA 13. Quadro de medição

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2023.

Para a correta instalação do MAR-722 na rede elétrica, as recomendações do manual do fabricante foram seguidas. Ele, possui 4 entradas BNC (Bayonet Neill-Concelman) para alicates de corrente e 5 entradas tipo jacaré para tensões, que é utilizado para fazer a conexão junto ao cabo da rede elétrica.

Primeiramente foram identificados os cabos de tensão que vem com o analisador. O cabo verde foi utilizado para a terra, azul para o neutro, amarelo para L1, preto para L2 e vermelho para L3.

Em seguida, foram colocados os alicates de corrente em torno dos condutores da fase A (L1), B (L2), C (L3) e N (neutro), verificando a uma seta de marcação que indica o sinal de polaridade correto. Em seguida foram feitas as conexões de tensão, começando com Terra (GND) e depois em sucessão N, A (L1), B (L2) e C (L3).

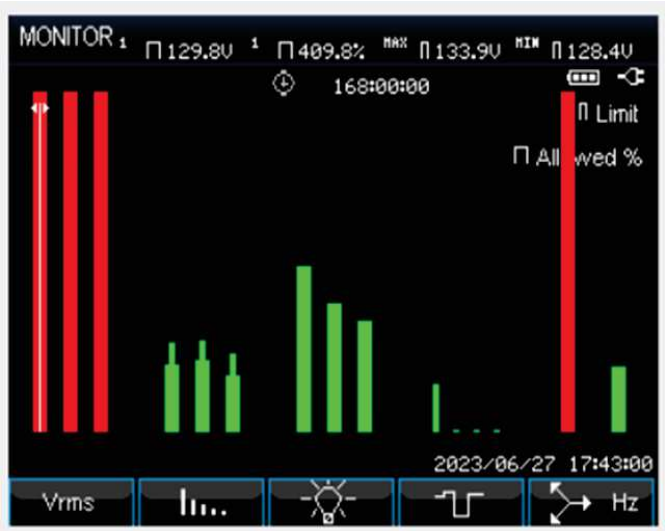
Entre os dias 07/06/2023 às 19:46:07 a 14/06/2023 às 19:26:07 foram realizadas as medições da categoria de "Potência e Energia". Esta função analisa os seguintes parâmetros com valores máximos, médios e mínimos: tensão e corrente RMS; frequência; potência ativa, aparente, reativa e fator de potência; desequilíbrio, tensão harmônica até 50ª harmônica; corrente harmônica até a 50° harmônica; tensão e corrente inter harmônica.

Em seguida, foram realizadas as medições da função "monitoramento de qualidade de energia" no período de 27/06/2023 às 17:43:00 a 04/07/2023 às 17:23:00, onde os parâmetros de variações de tensão em regime permanente; harmônicos; flutuação de tensão; variações de tensão de curta duração – VTCD; desequilíbrio de tensão e variação de frequência foram observados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados apresentados resultam de 1008 medições nas categorias definidas pelo PRODIST-8. Conforme ilustrado na Figura 14 os índices destacados em vermelho referem-se aos parâmetros fora dos limites definidos para manter qualidade de energia e os índices em verde referem-se aos parâmetros que se encontram de acordo. Observa-se que as faixas de variação de tensão em regime permanente e desequilíbrio de tensão não cumprem com os parâmetros do PRODIST-8, já o fator de potência, a distorção harmônica total, a flutuação de tensão (*flicker*), as variações de tensão de curta duração e a variação de frequência seguem em acordo como os limites definidos.

FIGURA 14. Monitor *software* Megabras

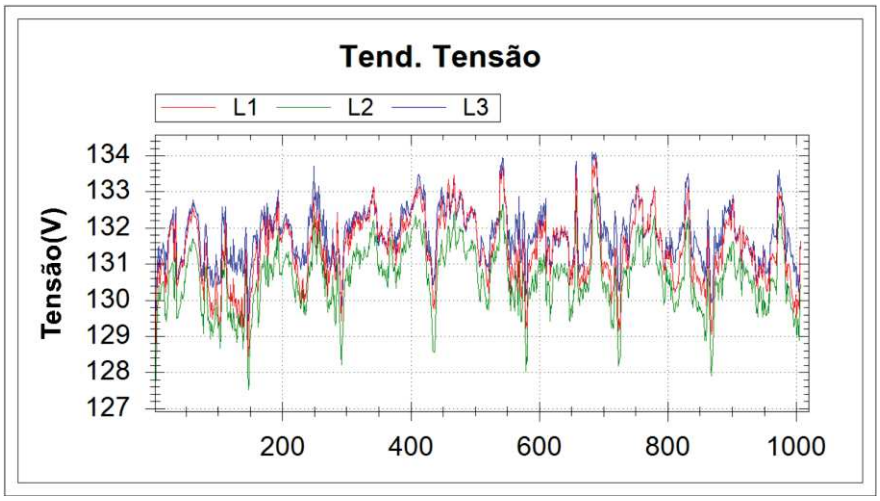


Fonte: Elaborado pelas autoras, 2023.

4.1. Variações de tensão

Conforme a Figura 15, percebe-se a variação de tensão acima do valor nominal que é V_{fase}=127V.

FIGURA 15. Tensão em regime permanente



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2023.

Verificou-se a quantidade de medições por valores de tensão utilizando como referência o histograma entregue pela CEMIG, em que o cliente percebeu o mal funcionamento dos motores ligados à unidade consumidora e contatou a concessionária para verificação (Anexo A). Como indicado na Tabela 9 e na Figura 16, confirmou-se medições fora da faixa adequada de tensão indicada no Módulo 8.

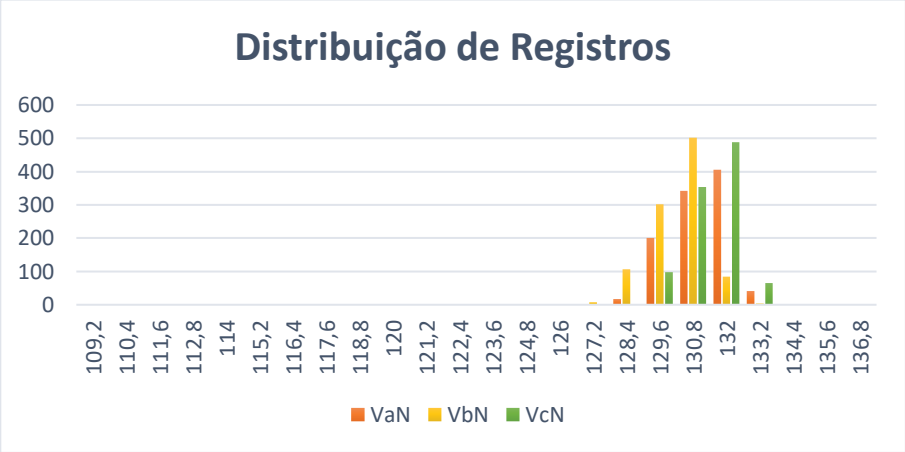
TABELA 9. Quantidade de medições por nível de tensão [V]

Tensão [V]	VaN	VbN	VcN
109,2	0	0	0
110,4	0	0	0
111,6	0	0	0
112,8	0	0	0
114	0	0	0
115,2	0	0	0
116,4	0	0	0
117,6	0	0	0
118,8	0	0	0
120	0	0	0
121,2	0	0	0
122,4	0	0	0
123,6	0	0	0
124,8	0	0	0
126	0	0	0
127,2	0	8	0
128,4	17	107	2
129,6	201	302	98
130,8	342	502	354

132	406	84	488
133,2	41	4	65
134,4	0	0	0
135,6	0	0	0
136,8	0	0	0
138	0	0	0

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

FIGURA 16. Distribuição da quantidade de medições por nível de tensão [V]



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

A Tabela 10 indica os valores de tensão adequada, precária e crítica por fase.

TABELA 10. Registro de faixa de tensão por fase

Registro por faixa			
Fase	Adequada	Precária	Crítica
VaN	967	41	0
VbN	1004	4	0
VcN	943	65	0

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

Visto que os limites dos indicadores DRP e DRC são 3,00% e 0,5%, respectivamente, o valor da duração relativa da transgressão precária encontrado na Equação 1 está acima do limite, já a duração relativa da transgressão crítica não foi necessário realizar cálculos pelo fato de não existir medições acima do limite crítico de tensões (Tabela 10).

$$DRP_1 = \frac{41}{1008} * 100[\%] = 4{,}06\%$$

$$DRP_2 = \frac{04}{1008} * 100[\%] = 0{,}4\%$$

$$DRP_3 = \frac{65}{1008} * 100[\%] = 6{,}45\%$$

A tabela 11 leva em consideração o maior índice de DRP calculado entre as fases e o limite esperado para manter a QEE do sistema.

TABELA 11. Indicadores calculados e esperados

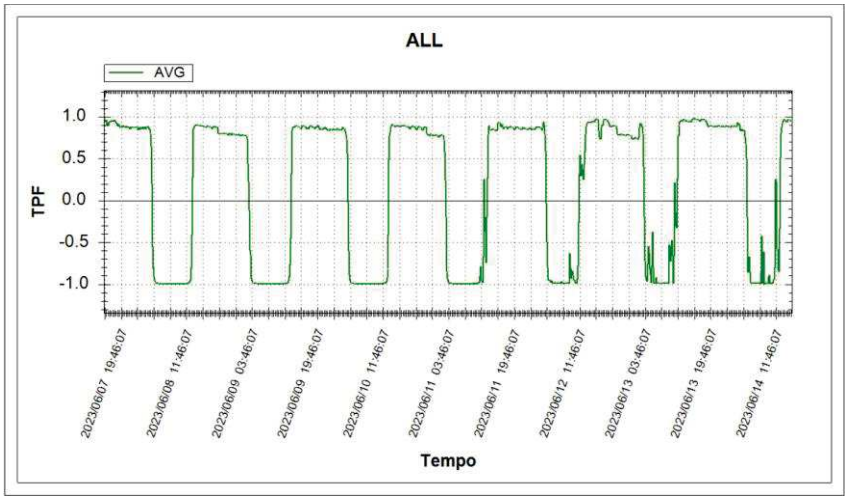
Indicadores		
	Valor [%]	Limite [%]
DRP	6,50	3,00
DRC	0,00	0,50

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

4.2. Fator de potência

A Figura 17 mostra que os valores do fator de potência variam de 1 a -1, isso acontece pelo fato de o campus possuir uma central geradora. Durante o dia, existe o consumo instantâneo, ou seja, o que é gerado pela usina se aplica direto ao consumo da instalação e os excedentes são injetados na rede. Como os inversores do sistema fotovoltaico estão parametrizados com fator de potência unitário, percebe-se, durante o período de geração, que o fator de potência é -1.

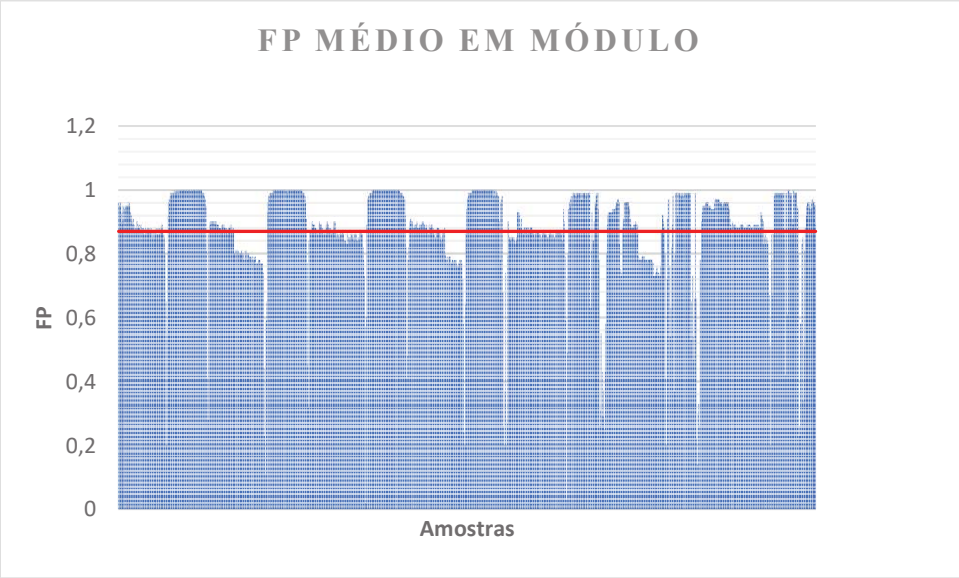
FIGURA 17. Fator de potência



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

A Figura 18 mostra o fator de potência médio de 0,87 considerando os valores em módulo.

FIGURA 18. Fator de potência médio



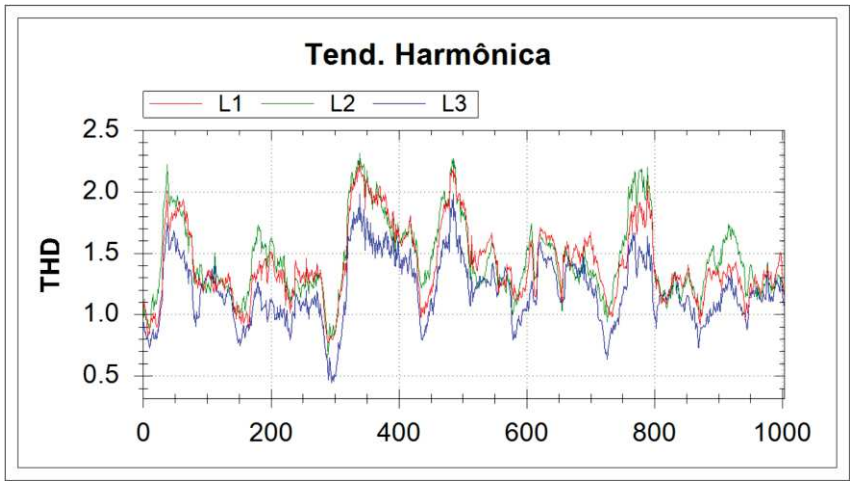
Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

Em razão da não obrigatoriedade da medição do fator de potência para unidades consumidoras do grupo B, no qual se enquadra o CEFET-MG Campus Nepomuceno, conforme Anexo B, mesmo o fator de potência fora do limite de 0,92 a 1 a variação deste não interfere consideravelmente o funcionamento do sistema.

4.3. Harmônicos

Em relação à distorção harmônica total na rede, cujo limite indicado para valores menores que 1 kV é de 10,0%, o valor de desequilíbrio apresentado ficou abaixo de 2,5%, conforme apresentado na Figura 19, portanto está de acordo com o módulo 8 do PRODIST.

FIGURA 19. Tendência harmônica



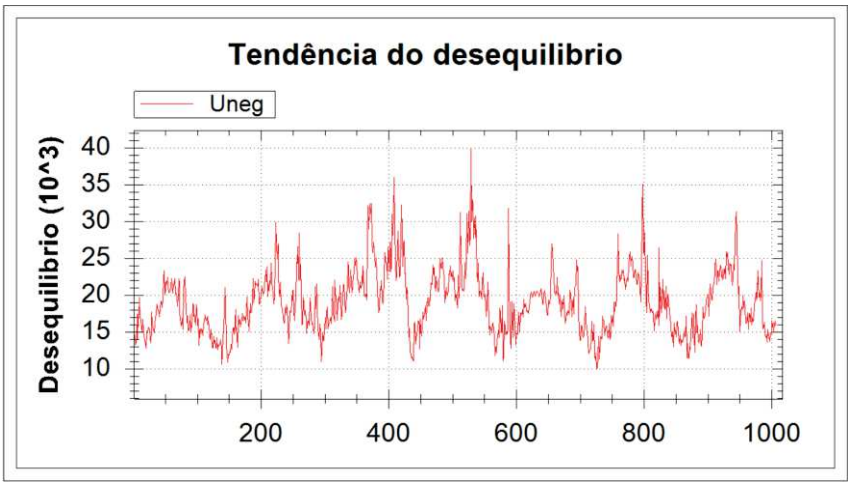
Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

4.4. Desequilíbrio de tensão

Conforme medições realizadas, e apresentadas na Figura 20, foi identificado um desequilíbrio de tensão de 39.929,23%. O Módulo 8 do PRODIST estabelece que o desequilíbrio de tensão não deve exceder 3%, limite considerado como o valor máximo desejável para um sistema de distribuição. O valor observado indica um desequilíbrio extremo na rede elétrica, o que pode resultar em falhas nos equipamentos, aumento de perdas elétricas e sobrecargas, comprometendo significativamente a qualidade e a segurança do fornecimento de energia.

As possíveis causas do desequilíbrio de tensão são cargas mal dimensionadas entre as fases, transformadores sobrecarregados ou variações de comportamento e demanda da carga.

FIGURA 20. Tendência do desequilíbrio

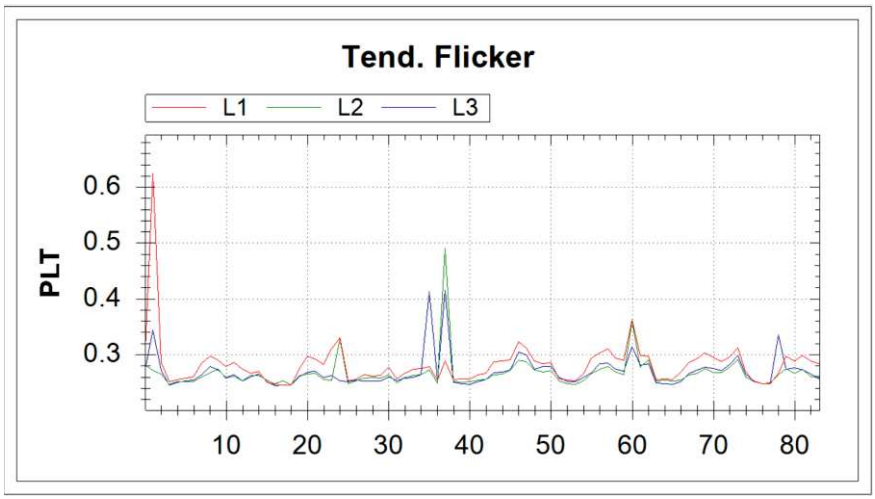


Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

4.5. Flutuação de tensão

Os valores de *flicker* observados na Figura 20 e na tabela 12 estão dentro dos padrões recomendados pelo Módulo 8, indicando que a flutuação de tensão na rede elétrica não representa um problema significativo de Flutuação de Tensão na rede elétrica que alimenta o local de medição. Todos os valores apresentados nas fases L1, L2 e L3 estão dentro dos limites, que é de 1 pu para Vn < 2,3 kV.

FIGURA 21. Tendência *flicker*



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

TABELA 12. Valores medidos tendência *flicker* por fase

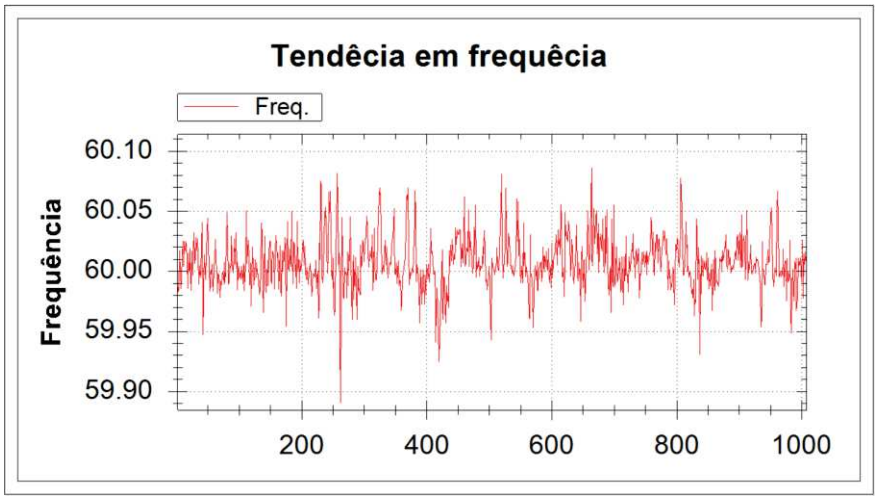
Categoria	L1	L2	L3
Flicker	0,62 pu	0,48 pu	0,41pu

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

4.6. Variação da frequência

Com relação aos resultados apresentados da frequência como mostrado na Figura 18, observou-se que os valores ficaram em uma faixa de operação entre 59,9 Hz e 60,1 Hz, o que atende o estabelecido no Módulo 8.

FIGURA 22. Tendência da frequência



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2024.

4.7. Fenômenos em regime transitório

Não foram identificados fenômenos como *Dips*, *Swells* e Interrupções durante o período de análise. Portanto, estes parâmetros estão de acordo com o Módulo 8.

5. CONCLUSÃO

A análise de problemas de qualidade de energia nos permite identificar prováveis causas e efeitos que contribuem na correção ou prevenção de possíveis falhas. Esses problemas não apenas afetam o desempenho dos equipamentos, mas também podem resultar em custos adicionais com manutenção e reparos, além de impactar a eficiência geral do sistema elétrico.

Durante o período analisado, foi possível determinar alguns problemas como variação de tensão, que podem ser causadas por curto-circuitos, impedâncias na rede e mudanças na demanda da carga, como à energização de maquinas de beneficiamento de café no período de safra, e o desequilíbrio de tensão que pode ser causado por cargas assimétricas conectadas às fases de um sistema trifásico, falhas em equipamentos que afetam a distribuição de tensão, conexões inadequadas de dispositivos trifásicos, desgaste de componentes elétricos e a falta de manutenção regular.

É de suma importância o monitoramento contínuo para mitigar esses problemas e garantir um fornecimento de energia de qualidade. Sendo assim, para trabalhos futuros recomenda-se analisar a possível causa dos problemas relacionados a qualidade de energia entregue para o Campus Nepomuceno, a fim de descobrir a real causa dos problemas encontrados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDABÓ, R. **Qualidade na energia elétrica**. São Paulo: Artliber, 2001. 252 p. ISBN 85-88098-02-4.

ANDRADE JÚNIOR, Gilvan Vieira de. **Análise estocástica dos afundamentos de tensão em sistemas de distribuição.** 2011. 191f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba Brasil, 2011.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST, Módulo 1 – Introdução** (Revisão 10) 2018.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST, Módulo 8 – Qualidade do fornecimento de energia elétrica** (Revisão 12) 2021.

ANEEL, RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 1.000- Seção VIII - **Fator de Potência e do Reativo excedente**, Art.302-303, 7 DE DEZEMBRO DE 2021. Disponível em: < https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html#_Toc127454225 >. Acesso em: 7 ago. 2024.

BEVILAQUA, Lucas; OLIBONI, Carlos RP. **Avaliação e determinação dos indicadores de qualidade e eficiência da energia elétrica**. Projeto apresentado na III FICE – Feira de Iniciação Científica e Extensão do Instituto Federal Catarinense – IFC, Campus Videira. Videira, 2014.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Manual de Distribuição ND-5.1: **Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas.** Belo Horizonte: CEMIG, 2023. 13 p.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor**. Avaliação da qualidade da energia elétrica**.2017.

DUGAN, Roger C. et al. **Electric power systems quality**. 2004.

ENERGÊS. **Tudo o que você precisa saber sobre o PRODIST.** 2021. Disponível em: <https://energes.com.br/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-prodist/> . Acesso em 22 out. 2023.

GESTAL (São Paulo). **Qualidade de Energia PRODIST**. 2022 Disponível em: <https://www.gestal.com/produtos/qualidade-de-energia-prodist#:~:text=A%20qualidade%20do%20produto%20engloba,a%20serem%20obse> . Acesso em: 13 mai. 2024.

GUIMARÃES, Professor Pablo. **Como resolver problemas com Desequilíbrio de Tensão**. 2020. Disponível em: <https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/como-resolver-problemas-com-desequilibrio-de-tensao> . Acesso em: 12 ago. 2024.

HANZELKA, Z.; BIEN, A. **Guia de aplicação de qualidade de energia. Disturbios de tensão: cintilamento**. 2006.

IEEE **Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**, Inst. Of Elect. & Eletronic, ISBN: 1559375493, 1995.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. Power quality measurement methods: relatório técnico. New York: IEC, 2003. 130 p.

JÚNIOR, Luiz Cera Zanetta. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência** Vol. 52. EdUSP, 2003.

MEGABRAS. **MAR722, analisador de energia trifásico: manual do usuário**. São Paulo: Megabras, 2017. 58 p.

MELHORN, C. J.; DAVIS, T. D.; BEAM, G. E. **Voltage Sags: Their Impact on the Utility and Industrial Customers**. IEEE Transactions on Industry Applications,Vol. 34, No. 3,pp. 549 – 558, May/Jun 1998.

MERKLE, Anne. **Análise da qualidade de energia**. 2018. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Unifacvest, Lages, 2018.

OLIVEIRA, J. C. Projeto SIDAQEE. **Qualidade da energia elétrica: definição e análise dos itens de qualidade.** Cap. II, Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica. 2000.

PAULILLO, Gilson. Atitude Editorial. **Desequilíbrio de Tensão**. O Setor Elétrico, S.I., v. 86, n. 3, p. 48-42, mar. 2013. Mensal.

PAULILLO, Gilson. Atitude Editorial. **Flutuações de Tensão**. O Setor Elétrico, S.I., v. 90, n. 7, p. 48-42, set. 2013. Mensal

POMILIO, José Antenor**. Pré-reguladores de Fator de Potência**. Publicação FEE, v. 3, p. 95, 2007.

SANTANA, M. W. **Agrupamento incremental de fluxo de dados para análise e monitoramento da qualidade de energia.** 2017. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

XAVIER, P.A. "**Avaliação das Características Elétricas de Reatores Eletrônicos Utilizados em Lâmpadas Fluorescentes Tubulares**" Dissertação- Universidade de Brasília, Brasília. 2005.

ANEXO A – RELATÓRIO DE CONFORMIDADE DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

RELATÓRIO DE CONFORMIDADE DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Identificação

Nome da área	
Equipamento	
Período	21/03/2023 15:40:00 à 28/03/2023 16:30:00
Intervalo de registros[s]	600
Registros válidos	1008

Tensão de referência [V] 120,00

Limite de tensão adequada

Mínimo [V]	Máximo [V]
110,00	126,00

Registros por faixa

Fase	Adequado	Precário	Crítico
VaN	640	144	224
VbN	650	143	215

Indicadores

	Valor [%]	Limite [%]
DRP	14,29	3,00
DRC	22,22	0,50

Mínimos

Fase	Valor [V]	Data	Hora
VaN	122,07	22/03/2023	16:00:00
VbN	121,98	21/03/2023	16:10:00

Máximos

Fase	Valor [V]	Data	Hora
VaN	132,84	27/03/2023	12:00:00
VbN	132,81	27/03/2023	12:00:00

Glossário

DRP - índice de duração relativa da transgressão para tensão precária, em percentual

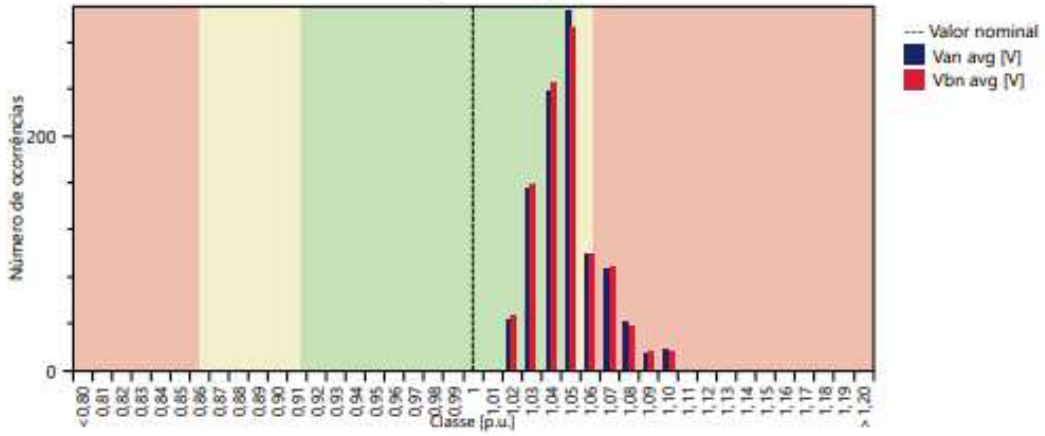
DRC - índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica, em percentual

Comentários

Tabela de registros

Classe [p.u.]	Centro [V]	VaN	VbN
0,80	96,00	0	0
0,81	97,20	0	0
0,82	98,40	0	0
0,83	99,60	0	0
0,84	100,80	0	0
0,85	102,00	0	0
0,86	103,20	0	0
0,87	104,40	0	0
0,88	105,60	0	0
0,89	106,80	0	0
0,90	108,00	0	0
0,91	109,20	0	0
0,92	110,40	0	0
0,93	111,60	0	0
0,94	112,80	0	0
0,95	114,00	0	0
0,96	115,20	0	0
0,97	116,40	0	0
0,98	117,60	0	0
0,99	118,80	0	0
1,00	120,00	0	0
1,01	121,20	0	0
1,02	122,40	44	48
1,03	123,60	155	160
1,04	124,80	239	246
1,05	126,00	307	293
1,06	127,20	99	99
1,07	128,40	88	89
1,08	129,60	42	39
1,09	130,80	15	16
1,10	132,00	18	17
1,11	133,20	1	1
1,12	134,40	0	0
1,13	135,60	0	0
1,14	136,80	0	0
1,15	138,00	0	0
1,16	139,20	0	0
1,17	140,40	0	0
1,18	141,60	0	0
1,19	142,80	0	0
1,20	144,00	0	0

Distribuição de registros



Relatório gerado com IMS PowerMANAGER Desktop conforme a norma ANEEL PRODIST Módulo 8, revisão 10. 29/03/2023 16:34:14

ANEXO B – FATURA DE AGOSTO DE 2024 DO CAMPUS

CEMIG

DOCUMENTO AUXILIAR DA NOTA FISCAL DE ENERGIA ELÉTRICA ELETRÔNICA
CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. CNPJ 06.981.180/0001-16 | INSC. ESTADUAL 062.3231500-0087.
AV. BARBACENA, 1200 - 17º ANDAR - ALA 1 - BAIRRO SANTO AGOSTINHO
CEP: 30190-131 - BELO HORIZONTE - MG.

REIMPRESSÃO

TARIFA SOCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA - TSEE FOI CRIADA PELA LEI Nº 10.438, DE 26 DE ABRIL DE 2002

CENTRO FEDERAL EDUCACAO TECNOLOGICA
AV MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 EL
CENTRO
37250-000 NEPOMUCENO, MG
CNPJ 17.220.2**/****-**

Referente a	Vencimento	Valor a pagar (R$)
AGO/2024	11/09/2024	109,53

Nº DO CLIENTE	Nº DA INSTALAÇÃO

Classe	Subclasse	Modalidade Tarifária	Datas de Leitura			
			Anterior	Atual	Nº de dias	Próxima
Poder Público Trifásico	Poder Publico Federal	Convencional B3	16/07	14/08	29	16/09

Valores Faturados

Itens da Fatura	Unid.	Quant.	Preço Unit	Valor (R$)	PIS/COFINS	Base Calc. ICMS	Aliq. ICMS	ICMS	Tarifa Unit.
Energia Elétrica	kWh	100	1,02780978	102,73	3,30	102,73	18,00	18,49	0,80944000
Energia SCEE ISENTA	kWh	5.420	0,54046000	2.929,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54046000
Energia compensada GD I	kWh	5.420	0,54046000	-2.929,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54046000
Contrib Ilum Publica Municipal				62,37					
Acerto de Faturamento				-49,58					
Imposto Retido - CSLL				-1,02					
Imposto Retido - COFINS				-3,08					
Imposto Retido - PIS/PASEP				-0,66					
Imposto Retido - IRPJ				-1,23					
TOTAL				**109,53**	**3,30**	**102,73**		**18,49**	
Bandeira Amarela - Já Incluído no valor a pagar				1,22					

Informações Técnicas

Tipo de Medição	Medição	Leitura	Leitura	Constante	Consumo kWh

Informações Gerais

SALDO ATUAL DE GERAÇÃO: 70.560,00 kWh. Tarifa vigente conforme Res Aneel nº 3.328, de 21/05/2024. Retenção de 5,85%, valor R$ 5,99 , conforme Art. 64 da lei nº 9430, de 27/12/96. Unidade faz parte de sistema de compensação de energia. O pagamento desta conta não quita débitos anteriores. Para estes, estão sujeitas penalidades legais vigentes (multas) e/ou atualização financeira (juros)baseadas no vencimento das mesmas. Leitura realizada conforme calendário de faturamento. É dever do consumidor manter os dados cadastrais sempre atualizados e informar alterações da atividade exercida no local. JUL/24 Band. Amarela - AGO/24 Band. Verde.

Histórico de Consumo

MÊS/ANO	Cons. kWh	Média kWh/Dia	Dias
AGO/24	5.520	190,34	29
JUL/24	5.360	167,50	32
JUN/24	4.800	154,83	31
MAI/24	4.560	157,24	29
ABR/24	6.400	206,45	31
MAR/24	6.320	217,93	29
FEV/24	4.880	162,66	30
JAN/24	5.040	157,50	32
DEZ/23	5.760	198,62	29
NOV/23	6.800	226,66	30
OUT/23	7.600	230,30	33
SET/23	6.720	231,72	29
AGO/23	6.960	210,90	33

Reservado ao Fisco

	Base de cálculo (R$)	Aliquota (%)	Valor (R$)
ICMS	102,73	18,00	18,49
PASEP	84,24	0,70	0,58
COFINS	84,24	3,24	2,72

Fale com CEMIG: 116 - CEMIG Torpedo 25010 - Ouvidoria CEMIG: 0800 728 3838 - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - Telefone: 167 - Ligação gratuita de telefones fixos e móveis.

CEMIG

PIX Pague Aqui

Código de Débito Automático	Instalação	Vencimento	Total a pagar
Agosto/2024		11/09/2024	R$109,53

RELATÓRIO FINAL DE CURSO Nº 18/2025 - CEENP (11.51.21)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 10/04/2025 15:09)
MARCIO WLADIMIR SANTANA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTETTNP (11.50.36)
Matrícula: ###520#9

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/documentos/ informando seu número: ***18****, ano:* ***2025****, tipo:* ***RELATÓRIO FINAL DE CURSO****, data de emissão:* ***10/04/2025*** *e o código de verificação:* ***04fd023fb8***