UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

Gabriel Fernandes Ferreira

Análise da inversão do fluxo de potência em instalação elétrica industrial com geração de energia solar fotovoltaica.

Goiânia
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Gabriel Fernandes Ferreira

Título do trabalho: **Análise da inversão do fluxo de potência em instalação elétrica industrial com geração de energia solar fotovoltaica**

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO[1]

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;

- Submissão de artigo em revista científica;

- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por **Fernando Nunes Belchior**, **Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2024, às 22:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Fernandes Ferreira**, **Discente**, em 16/12/2024, às 19:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5041969** e o código CRC **49E9C6C3**.

Gabriel Fernandes Ferreira

Análise da inversão do fluxo de potência em instalação elétrica industrial com geração de energia solar fotovoltaica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Ferreira, Gabriel Fernandes
Análise da inversão do fluxo de potência em instalação elétrica industrial com geração de energia solar fotovoltaica. [manuscrito] / Gabriel Fernandes Ferreira. - 2024.
81 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior; co-orientador Kairo de Almeida Faria Pires Júnior.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2024.
Bibliografia.
Inclui gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Inversão de Fluxo de Potência. 2. Geração Solar. 3. Indústria. 4. Energia. 5. Sustentabilidade. I. Belchior, Fernando Nunes, orient. II. Título.

CDU 621.3

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) 3 dia(s) do mês de Dezembro do ano de 2024 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Análise da inversão do fluxo de potência em instalação elétrica industrial com geração de energia solar fotovoltaica.”, de autoria de Gabriel Fernandes Ferreira, do curso de Engenharia Elétrica, do(a) EMC da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior (FCT/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Marcelo Stehling de Castro (EMC/UFG), Prof. Dr. Antônio Melo de Oliveira (EMC/UFG) e Eng. Kairo Hitler de Almeida Faria Pires Junior (Empresa Volga). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 10 (dez) , tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Fernando Nunes Belchior**, **Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2024, às 22:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **Antonio Melo De Oliveira**, **Professor do Magistério Superior**, em 16/12/2024, às 09:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Stehling De Castro**, **Professor do Magistério Superior**, em 16/12/2024, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

Documento assinado eletronicamente por **Kairo Hitler De Almeida Faria Pires Junior** , **Usuário Externo**, em 16/12/2024, às 19:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020 .

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5041971** e o código CRC **9983B3CD**.

Referência: Processo nº 23070.045484/2024-73 SEI nº 5041971

RESUMO

A crescente integração de geração distribuída, especialmente a energia solar fotovoltaica, em instalações industriais, tem exposto desafios críticos para a estabilidade e qualidade dos sistemas elétricos. Fenômenos como inversão do fluxo de potência, distorções harmônicas, desequilíbrios de corrente e tensão, além de variações no fator de potência, tornam a operação elétrica mais complexa, exigindo estratégias avançadas de monitoramento e controle. Esses desafios são ampliados em contextos industriais, onde a demanda energética é altamente dinâmica e sujeita a variações abruptas, intensificando as interações entre a geração local e a rede elétrica. Essas dinâmicas podem gerar impactos significativos na confiabilidade do sistema, comprometendo a eficiência dos equipamentos, reduzindo sua vida útil e aumentando os custos operacionais. Além disso, as distorções na qualidade da energia podem causar desgaste prematuro de componentes críticos, sobrecarga de transformadores e interrupções na operação fabril, afetando diretamente a produtividade. Tais consequências evidenciam a necessidade de soluções que alinhem a operação elétrica à conformidade com normas regulatórias, assegurando a estabilidade e eficiência dos sistemas. A motivação principal para este estudo surgiu de um incidente relatado pela equipe de manutenção da Volga Engenharia, quando uma sobrecarga no transformador de entrada levou à atuação de suas proteções, removendo-o do sistema e evitando uma falha catastrófica no equipamento. Esse evento crítico destacou a necessidade de compreender profundamente os fenômenos associados à geração distribuída, especialmente a inversão do fluxo de potência e seus impactos no sistema elétrico. Foi nesse contexto que surgiu a oportunidade de alinhar este trabalho acadêmico de conclusão de curso à problemática enfrentada pela empresa, com um olhar voltado tanto para os desafios práticos quanto para as soluções acadêmicas e técnicas. Ao longo do desenvolvimento do trabalho, foi possível ampliar o escopo da análise, explorando questões adicionais relacionadas à qualidade da energia elétrica e às condições específicas de operação da planta. Dados obtidos durante o monitoramento permitiram uma visão detalhada dos efeitos da inversão abrupta do fluxo de potência e seus desdobramentos em outros parâmetros críticos, como os desequilíbrios de corrente e as distorções harmônicas. A integração dessas análises reafirma a importância de estudos como este, que buscam não apenas compreender os desafios impostos pela geração distribuída, mas também propor soluções que garantam a eficiência, segurança e sustentabilidade dos sistemas industriais.

Palavras-chave: Qualidade de energia elétrica. Inversão de fluxo de potência. Harmônicos. 17 ODS. Geração fotovoltaica.

ABSTRACT

The increasing integration of distributed generation, particularly solar photovoltaic energy, in industrial installations has revealed critical challenges for the stability and quality of electrical systems. Phenomena such as power flow inversion, harmonic distortions, current and voltage imbalances, and power factor variations add complexity to electrical operations, demanding advanced monitoring and control techniques. These challenges are further exacerbated in industrial contexts, where energy demand is highly dynamic and subject to abrupt changes, intensifying the interactions between local generation and the electrical grid. Such dynamics can significantly impact system reliability, compromising equipment efficiency, reducing lifespan, and increasing operational costs. Moreover, energy quality distortions can cause premature wear of critical components, transformer overloads, and disruptions to plant operations, directly affecting productivity. These consequences highlight the need for solutions that align electrical operations with regulatory compliance, ensuring system stability and efficiency. The main motivation for this study emerged from an incident reported by the maintenance team at Volga Engenharia, where an overload in the entry transformer tripped its protections, disconnecting it from the system and preventing catastrophic equipment failure. This critical event highlighted the need to deeply understand the phenomena associated with distributed generation, particularly power flow inversion and its impacts on the electrical system. In this context, the opportunity arose to align this academic research project with the challenges faced by the company, focusing on practical and technical solutions. Throughout the development of this work, the scope of the analysis expanded to address additional issues related to energy quality and specific operational conditions of the plant. Data obtained during monitoring provided a detailed view of the effects of abrupt power flow inversion and its implications on other critical parameters, such as current imbalances and harmonic distortions. This analysis reinforces the importance of studies like this one, aiming not only to understand the challenges posed by distributed generation but also to propose solutions that ensure efficiency, safety, and sustainability for industrial systems.

Keywords: Power quality. Power flow inversion. Harmonics. 17 ODS. Photovoltaic generation.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria, por nos presentear com um universo tão rico e fascinante, repleto de complexidade e harmonia, que temos o privilégio de desbravar por meio da ciência e do estudo da engenharia. É na grandiosidade e nos mistérios da criação divina que encontramos inspiração para avançar no conhecimento, sempre buscando soluções que honrem essa dádiva.

À conclusão deste trabalho, sinto-me imensamente grato a todas as pessoas e instituições que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para sua realização. Em primeiro lugar, expresso minha profunda gratidão à minha família, pelo suporte constante, amor e incentivo ao longo dessa jornada. À minha mãe, Maria Divina Fernandes, e ao meu pai, Donizeth Euripedes Ferreira, agradeço por serem exemplos de dedicação, sabedoria e resiliência, valores que sempre me inspiraram. À minha companheira de vida, Valentina Borges Carrijo Ferreira, meu reconhecimento pelo apoio incondicional, paciência e motivação nos momentos mais desafiadores.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Dr. Fernando Nunes Belchior, cuja orientação, paciência e experiência foram fundamentais para o sucesso deste estudo. À coorientação do engenheiro Kairo de Almeida Farias Pires Júnior, registro minha gratidão pelas contribuições técnicas e pela prontidão em solucionar desafios encontrados ao longo do trabalho. Ao engenheiro Henrique Bastos Viana, amigo e grande auxiliador, agradeço profundamente pela parceria nas medições e pela valiosa instrução no uso dos equipamentos, que foi essencial para o desenvolvimento deste estudo.

Reconheço com admiração o corpo docente da Universidade Federal de Goiás, que proporcionou um ensino de excelência e me preparou com uma base sólida para a realização deste trabalho. Cada professor, com sua dedicação e esforço, desempenhou um papel essencial na minha formação acadêmica e profissional, e sou profundamente grato por isso.

Estendo meus agradecimentos à Volga Engenharia, que generosamente abriu as portas de sua valiosa planta industrial para a realização deste estudo. A empresa não apenas disponibilizou uma infraestrutura de altíssima qualidade, mas também forneceu equipamentos de custo muito elevado sem quaisquer encargos, permitindo que este trabalho pudesse ser conduzido com a profundidade e a precisão necessárias. Essa colaboração foi um gesto de nobreza e visão, refletindo o compromisso da empresa com a disseminação do conhecimento e o avanço técnico-científico.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, seja por meio de apoio direto, inspiração ou incentivo. Este trabalho é resultado não apenas do esforço individual, mas de um conjunto de colaborações que enriqueceram cada etapa desta jornada. A todos, meu sincero e profundo obrigado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito retificador de meia onda. 16
Figura 2 - Tensão sobre a fonte "V1". 17
Figura 3 - Corrente recebida pela carga “R1”. 17
Figura 4 - Corrente fornecida pela fonte “V1” 18
Figura 5 - Retificação de meia onda e as harmônicas que a compõem. 20
Figura 6 - O tetraedro de potências. 21
Figura 7 - Medição horária de carga elétrica descontadas gerações eólica e solar, California, 22 de outubro de 2016. 27
Figura 8 - Imagem aérea de usina fotovoltaica 300kWp da Volga Engenharia 41
Figura 9 - Diagrama unifilar de entrada e QTA da Volga Engenharia. 43
Figura 10 - Imagem interna do QTA com medidor instalado. 44
Figura 11 - Analisador de energia Fluke 1775 45
Figura 12 - Sensor de corrente tipo Rogowski iFlex1500-24. 46
Figura 13 - Interface *Fluke Energy Analyze Plus 3.11.* 47
Figura 14 – Configuração de medição, resumo do *"Fluke Energy Analyze Plus 3.11".* 50
Figura 15 - Potência nos barramentos do QTA 52
Figura 16 - Potência fornecida pela usina fotovoltaica 300kWp. 53
Figura 17 – Potência lida na conexão geral no dia 25/03/2024 54
Figura 18 - Potência gerada pela usina fotovoltaica 300kWp no dia 25/03 /2024 56
Figura 19 - Forma de onda sob influência de harmônicos. 58
Figura 20 - Corrente elétrica nas fases das 50 harmônicas na Volga engenharia – 25/03/2024 às 11hs 59
Figura 21 - Corrente elétrica dos 15 primeiros harmônicos às 11:00hs do dia 25/03/2024. 60
Figura 22 - Corrente elétrica dos 15 primeiros harmônicos às 11:50 do dia 25/03/2024. 61
Figura 23 - Corrente elétrica dos 15 primeiros harmônicos às 13hs do dia 25/03/2024 62
Figura 24 - Medição de distorção harmônica total de tensão ao longo do período do estudo. 63
Figura 25 - Medição de distorção harmônica total realizada no dia 25/03/2024. 64
Figura 26 - Tensão média medida durante os 7 dias do estudo. 66
Figura 27 - Fator de potência verdadeiro 67
Figura 28 - Fator de potência verdadeiro – 25/03/2024. 68
Figura 29 - Balanço de potências ativa e reativa 25/04/2024 69
Figura 30 - Percentual de desequilíbrio de tensão ao longo do estudo. 71
Figura 31 - Percentual de desequilíbrio de corrente ao longo do estudo. 73
Figura 32 - Percentual de desequilíbrio de corrente ao longo do dia 25/03/2024. 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 2,3 kV (380/220). 49
Tabela 2 - Limites de desequilíbrio de tensão segundo o PRODIST. 72

Sumário

1 INTRODUÇÃO 10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 11
2.1 Entendendo a tensão e corrente elétrica 12
2.2 Um olhar para a frequência da rede elétrica brasileira 13
2.3 O processo de geração fotovoltaica 15
2.4 Potência e trabalho em sistemas de tensão alternada: 20
2.5 O fator de potência: 24
2.6 Análise de fluxo de potência: 25
2.7 A Curva do pato: 26
2.8 Sistemas fotovoltaicos: 28
2.9 Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: 29
2.10 Considerações finais 30
3 METODOLOGIA 31
3.1 Início 32
3.2 Definir objetivos para a medição: 32
3.3 Identificar pontos de medição: 34
3.4 Selecionar instrumentos: 35
3.5 Calibrar e configurar os equipamentos 37
3.6 Realizar a medição 37
3.7 Analisar os dados coletados 38
3.8 Relatório e proposta de solução 39
3.9 Considerações finais 39
4 ESTUDO DE CASO 40
4.1 Início: 40
4.2 Definir objetivos para a medição: 42
4.3 Identificar pontos de medição: 42
4.4 Selecionar instrumentos de medição: 44
4.5 Configurar e calibrar os instrumentos: 47
4.6 Realizar a medição: 51
4.7 Análise dos dados coletados: 74
4.8 Relatório e proposta de solução: 77
5 CONCLUSÕES 79

6 REFERÊNCIAS 81

1 INTRODUÇÃO

A crescente integração de fontes renováveis ao sistema elétrico, especialmente a geração fotovoltaica distribuída, tem trazido novos desafios e oportunidades para o setor de energia. Esse cenário destaca a necessidade de compreender os impactos técnicos e econômicos da interação entre geração distribuída e consumo, especialmente em ambientes industriais, onde a demanda energética é dinâmica e intensa. Este estudo, conduzido na unidade fabril da Volga Engenharia, visa explorar essas questões ao investigar a qualidade de energia elétrica e os fenômenos associados à inversão do fluxo de potência em sistemas com geração fotovoltaica.

A Volga Engenharia, uma empresa de referência na produção de painéis elétricos e soluções pré-montadas em Eletrocentro, representa um caso ideal para esse tipo de análise. Localizada em Aparecida de Goiânia e equipada com uma usina fotovoltaica de 300 kWp, a empresa possui uma operação industrial robusta, cuja dinâmica energética reflete as complexidades enfrentadas por diversas indústrias modernas. A escolha desse ambiente possibilitou uma investigação detalhada sobre a interação entre a geração local e a rede elétrica, considerando aspectos como distorções harmônicas, desequilíbrios de corrente e tensão, e flutuações de potência.

Este trabalho tem como objetivo não apenas identificar os desafios relacionados à qualidade de energia elétrica, mas também propor soluções técnicas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Almeja-se, assim, promover uma operação mais eficiente e sustentável, contribuindo para o desenvolvimento de práticas que favoreçam a transição energética e a inovação tecnológica no setor industrial. A abordagem adotada incluiu a análise de parâmetros críticos, como corrente de neutro, fator de potência, distorções harmônicas e flutuações de tensão. Além disso, buscou-se compreender o impacto da geração fotovoltaica em momentos de baixa demanda, como nos finais de semana, e propor estratégias para otimizar a interação entre geração e consumo. Para isso, foram utilizados instrumentos avançados de medição e análise, que permitiram capturar dados em alta resolução e avaliar a dinâmica energética com precisão.

Este estudo também se revelou uma oportunidade única para o aprofundamento do aprendizado em engenharia elétrica. Ao revisitar conceitos técnicos fundamentais e aplicá-los em um contexto prático, foi possível reforçar o conhecimento teórico e desenvolver competências essenciais para a resolução de problemas complexos no campo

da engenharia de energia. Os resultados apresentados não apenas destacam os desafios enfrentados pela Volga Engenharia, mas também demonstram como a inovação técnica pode ser aplicada para superar barreiras e alinhar a operação industrial aos princípios de sustentabilidade. A partir desta análise, espera-se que as conclusões e propostas de solução sirvam como base para futuras iniciativas no setor, promovendo uma operação energética mais eficiente, sustentável e economicamente vantajosa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica é um dos pilares essenciais de qualquer trabalho acadêmico, proporcionando a base conceitual e contextual necessária para a compreensão do tema abordado. Neste capítulo, serão discutidos os principais conceitos relacionados à qualidade da energia elétrica, com foco nos desafios introduzidos pela geração distribuída de energia solar e o fenômeno de inversão do fluxo de potência.

A crescente adoção de sistemas de geração distribuída, especialmente a partir de fontes solares fotovoltaicas, tem transformado o panorama energético global, trazendo consigo benefícios significativos, como a redução de emissões de gases de efeito estufa e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis. No entanto, essa transição também apresenta desafios técnicos, entre os quais se destaca a inversão do fluxo de potência, um fenômeno que pode afetar a estabilidade e a qualidade da energia elétrica fornecida.

Neste contexto, torna-se imprescindível compreender os parâmetros que definem a qualidade da energia elétrica, como tensão, frequência, harmônicos, e fluxo de potência. A análise desses parâmetros é fundamental para identificar e mitigar os impactos negativos da geração distribuída sobre a rede elétrica. Além disso, a "curva do pato", um conceito emergente que descreve as variações na demanda de eletricidade ao longo do dia em redes com alta penetração de energia solar, será explorada para ilustrar os desafios operacionais enfrentados pelas concessionárias de energia. Outro aspecto crucial é a avaliação do fator de potência em sistemas com harmônicos, uma vez que a presença desses componentes pode reduzir a eficiência energética e causar danos aos equipamentos.

2.1 Entendendo a tensão e corrente elétrica

A tensão elétrica, também conhecida como diferença de potencial elétrico, é a medida da força com que os elétrons são impulsionados através de um condutor elétrico. É definida como a quantidade de energia necessária para mover uma carga elétrica de um ponto a outro em um circuito. A unidade de medida da tensão elétrica é o Volt (V), nomeada em homenagem ao físico italiano Alessandro Volta. Em termos práticos, a tensão elétrica pode ser comparada à pressão da água em uma tubulação: quanto maior a tensão, maior é a capacidade de movimentar cargas elétricas através de um condutor. A corrente elétrica é o fluxo de elétrons através de um condutor, impulsionado pela diferença de potencial (tensão) entre dois pontos. A intensidade da corrente elétrica é medida em Ampéres (A), em homenagem ao físico francês André-Marie Ampère. A corrente pode ser comparada ao fluxo de água em uma tubulação: quanto maior o fluxo de água, maior é a corrente. Existem dois tipos principais de corrente elétrica: corrente contínua (CC), onde os elétrons fluem em uma única direção, e corrente alternada (CA), onde os elétrons alternam a direção do fluxo periodicamente. A corrente elétrica é fundamental para o funcionamento de dispositivos elétricos e eletrônicos, pois é ela que transporta a energia necessária para operar esses dispositivos.

A manutenção da tensão dentro de limites específicos é crucial para garantir o funcionamento adequado dos aparelhos elétricos e a estabilidade das redes de distribuição de energia elétrica. Variações significativas na tensão podem levar a danos em equipamentos, redução da eficiência energética e problemas na qualidade da energia fornecida. Para medir a tensão de forma precisa, especialmente em sistemas onde a forma de onda da tensão não é puramente senoidal devido à presença de harmônicos, utilizam-se medidores TRUE RMS (em inglês "*Root Mean Square*" ou valor eficaz verdadeiro). Esses medidores calculam tensão e corrente eficazes levando em consideração todas as componentes da forma de onda, proporcionando uma medição mais precisa e representativa das condições reais do sistema elétrico.

Para o estudo dos circuitos em CA (corrente alternada), as formas de onda de tensão e corrente elétrica são dadas respectivamente pelas equações (1) e (2):

$$v\,(t) = V_{máx}\cos(\omega t + \theta_v) \tag{1}$$

$$i(t) = I_{máx}\cos(\omega t + \theta_i) \tag{2}$$

Sabendo-se a forma de onda que descreve o comportamento de tensão e corrente elétrica no domínio do tempo, pode-se obter valores eficazes por meio das equações (3) e (4):

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2 dt} \tag{3}$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} \tag{4}$$

Como será descrito mais à frente neste capítulo, as componentes harmônicas são formas de onda também senoidais, para o caso deste estudo, de frequências múltiplas da frequência fundamental. A soma destas formas de onda resulta na forma de onda original do sinal de tensão e corrente elétrica. Desta forma, ao aplicar-se a soma RMS das componentes harmônicas, obtém-se os parâmetros RMS do sinal original.

2.2 Um olhar para a frequência da rede elétrica brasileira

A frequência da rede elétrica e o comportamento senoidal da corrente alternada gerada estão diretamente ligados às características rotativas dos geradores síncronos e à taxa de variação do campo magnético nos enrolamentos do estator. A rotação uniforme do rotor, combinada com o design dos pólos do gerador, cria uma variação senoidal do campo magnético que, por sua vez, induz uma corrente elétrica senoidal na rede elétrica.

A estabilidade da frequência é vital para a operação segura e eficiente do sistema elétrico. Desvios significativos na frequência podem causar problemas sérios, como:

- Desempenho Ineficiente: Equipamentos elétricos, como motores e eletrodomésticos, são projetados para operar em uma frequência específica. Frequências fora do padrão podem reduzir a eficiência desses dispositivos.

- Risco de Danos: Equipamentos eletrônicos sensíveis podem ser danificados por variações de frequência.

- Sincronização do Sistema: A interconexão de várias fontes de geração de energia requer que todas operem na mesma frequência. Desvios podem levar a problemas de sincronização e até a apagões.

A adoção da frequência de 60 Hz no Brasil ocorreu de forma gradual, ao longo das décadas de 1930 e 1940, mas não foi um ato específico de um único governo. Foi um processo liderado por órgãos reguladores e empresas do setor elétrico, com apoio governamental para unificar o sistema elétrico nacional. Entretanto, o marco importante para a padronização do setor elétrico brasileiro veio durante o governo de Getúlio Vargas, especialmente com a criação do Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica (CNAEE) em 1939. O CNAEE foi fundamental na elaboração de políticas para o setor elétrico, incluindo a padronização da frequência de 60 Hz como padrão nacional. A padronização foi consolidada nas décadas seguintes, com a expansão das usinas hidrelétricas e da interconexão dos sistemas regionais.

Os operadores do sistema de energia utilizam várias estratégias para manter a frequência estável. Pode-se controlar a velocidade do rotor no sistema de geração, regulando-se a potência aplicada pela fonte geradora (o fluxo de água pelas turbinas para o caso de uma usina hidrelétrica). A operação com reserva de potência operacional também é uma estratégia para emergências que solicitem uma rápida resposta de incremento de geração do sistema. A qualquer momento podem surgir aumentos abruptos e inesperados das cargas nos barramentos do sistema, esse evento provoca um desbalanço entre o torque mecânico aplicado ao eixo do gerador e forças eletromagnéticas provenientes do estator no qual há a indução de tensão e correntes elétrica. Neste desbalanço ocorre uma ligeira desaceleração do rotor do gerador síncrono, e, por conseguinte, da frequência da rede elétrica. Esta variação é rapidamente detectada pelas diversas, e precisas, proteções dos sistemas de geração e ocorre então um aumento de potência da fonte geradora (aumenta-se o fluxo de água pela turbina para o caso de uma usina hidrelétrica), esta contramedida só se faz possível em virtude da existência de uma reserva operacional da unidade geradora.

A inércia do sistema elétrico refere-se à resistência natural do sistema contra mudanças bruscas na frequência da rede elétrica. No contexto do sistema elétrico brasileiro, essa inércia é significativamente influenciada pelos grandes geradores síncronos das hidrelétricas, que são a principal fonte de geração de energia no país. No Brasil, cerca de 61,9% da matriz elétrica foi proveniente de fontes hidráulicas em 2022 (“MATRIZ ENERGÉTICA”, [s.d.]), isso significou que foram gerados por meio de grandes geradores síncronos, com grande momento de inércia cada um, aproximadamente 419 TWh de energia elétrica. Essa característica torna o Sistema Interligado Nacional (SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL, (2024)) um dos mais robustos e resilientes

do mundo. Perturbações capazes de provocar grandes variações na frequência do sistema nacional, devem ser de ordem de grandeza demasiadamente altas, que por sua vez também são eventos de rara ocorrência.

O aumento da contribuição da fotogeração distribuída:

> "A expansão da capacidade instalada da matriz elétrica foi de 7 Gigawatts (GW) entre janeiro e agosto de 2023. Desse total, 6,2 GW têm origem nas fontes solar e eólica. Na série histórica, este ano apresentou o maior aumento da geração solar e o segundo maior incremento na energia eólica. As fontes renováveis compreendem 83,79% de toda a matriz elétrica do Brasil, uma referência internacional em energia limpa. A fonte solar teve acréscimo de 3 Gigawatts à matriz energética brasileira, enquanto os ventos foram responsáveis por um aumento de 3,2 GW ao Sistema Interligado Nacional (SIN). O ministro de Minas e Energia, Alexandre Silveira, vê o país como exemplo de energia sustentável." ("Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023 — Ministério de Minas e Energia", [s.d.])

A crescente utilização de fontes de baixa inércia, como a energia solar, oferece inúmeras vantagens em termos de sustentabilidade e descentralização da geração de energia. No entanto, também apresenta desafios significativos para a estabilidade do sistema elétrico devido à sua variabilidade e falta de inércia natural. A adoção de soluções tecnológicas, como inércia virtual, sistemas de armazenamento de energia e controles inteligentes, é essencial para integrar essas fontes de maneira eficaz e garantir a estabilidade da rede. Assim, o sistema elétrico brasileiro pode se beneficiar da energia solar enquanto mantém a confiabilidade e a eficiência operativa. A geração solar distribuída é classificada com baixa inércia em virtude da não existência de partes móveis envolvidas no processo. Este ponto torna os sistemas duráveis e de baixa complexidade de manutenção, mas também o torna mais suscetível a perturbações no sistema integrado. O aumento da contribuição dessas fontes na matriz elétrica brasileira, implica dizer que o sistema tende a ficar menos robusto, à medida que essa porcentagem cresce.

2.3 O processo de geração fotovoltaica

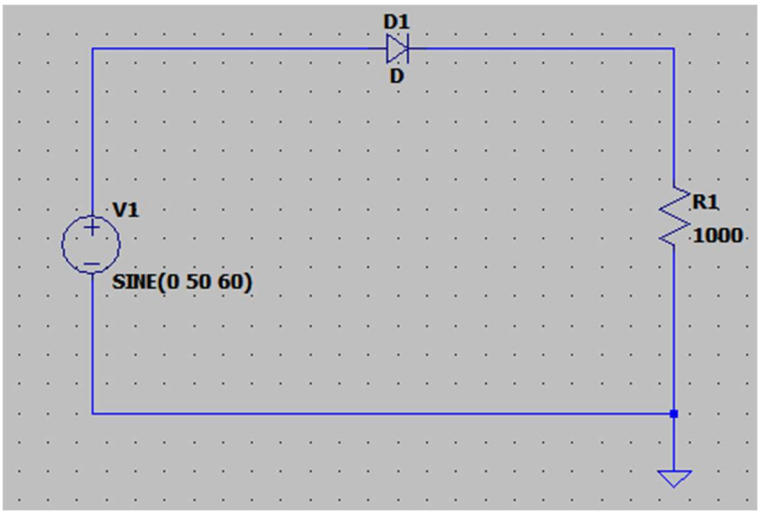
Para o bom entendimento deste trabalho, é preciso entender como a inserção de cargas não lineares, como os inversores utilizados na geração fotovoltaica, impactam na rede como um todo. A seguir serão exploradas as ferramentas matemáticas que são utilizadas para avaliar os impactos destas cargas, e, também, permitir a mitigação destes efeitos.

Durante o processo de retificação ou reconstrução da forma de onda senoidal (processo conhecido como inversão) elétrica, os harmônicos são gerados devido à

natureza não linear da operação dos dispositivos de retificação, como diodos e tiristores. Vamos explorar de onde vêm esses harmônicos e como eles afetam o sistema elétrico.

Os harmônicos são componentes de frequência múltipla da frequência fundamental. No contexto da retificação, eles surgem devido à forma não senoidal da corrente após o processo de retificação. Para ilustrarmos este processo, realizaremos uma simulação computacional com um retificador simples de meia onda, o circuito simulado será o posto abaixo:

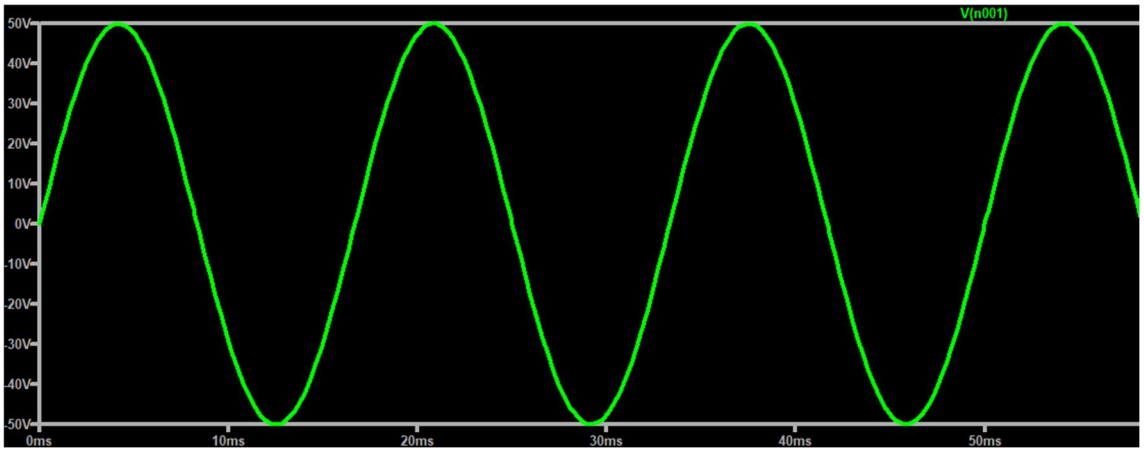
Figura 1 - Circuito retificador de meia onda.



Fonte: Próprio autor, 2024.

A fonte “V1” está inserindo um sinal de tensão senoidal com amplitude de 50V (pico), sob uma frequência de 60 Hz, com uma carga “R1” igual a 1000 Ω (Ohm`s). A seguir, será retratado a forma de onda do sinal de tensão fornecido pela fonte “V1”.

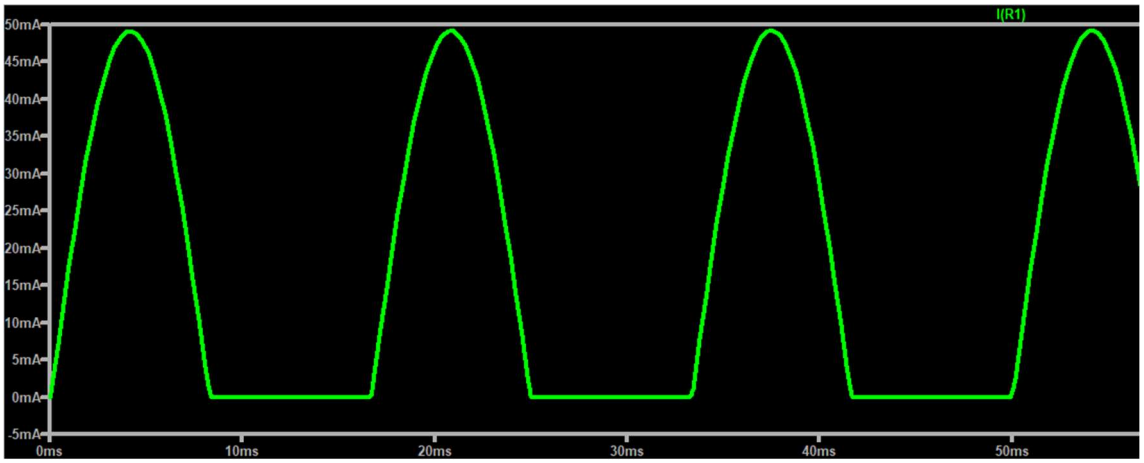
Figura 2 - Tensão sobre a fonte "V1".



Fonte: Próprio autor, 2024.

A jusante do circuito retificador, é observado a seguinte forma de onda de corrente pela carga “R1”:

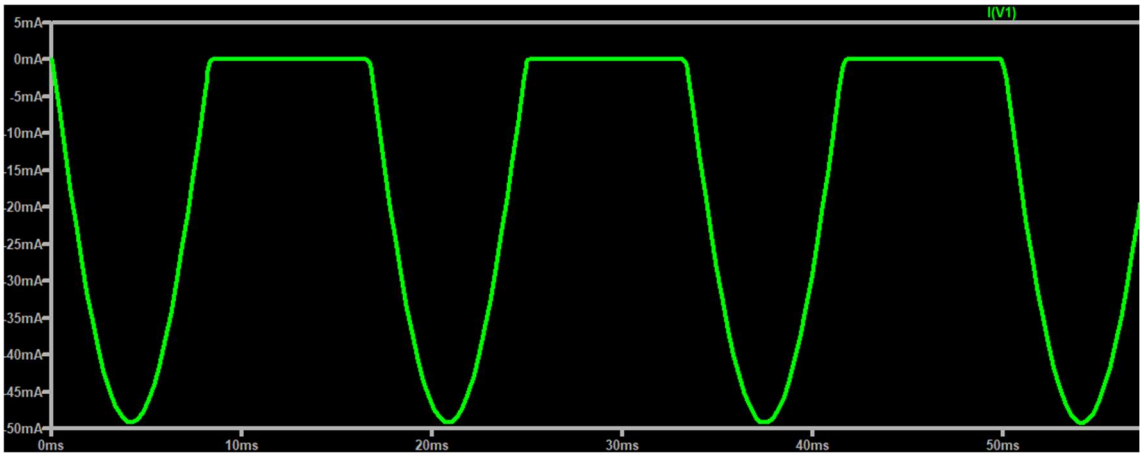
Figura 3 - Corrente recebida pela carga “R1”.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Pela topologia simplificada do sistema simulado, intuitivamente percebe-se que a corrente sobre a carga “R1” só pode ser de igual valor a corrente fornecida pela fonte “V1”.

Figura 4 - Corrente fornecida pela fonte “V1”



Fonte: Próprio autor, 2024.

As correntes aparecem com sinais invertidos em razão do fluxo de potência, que será discutido mais à frente neste trabalho. A potência é fornecida pela fonte “V1” para a carga “R1”.

Embora o sinal de tensão seja puramente senoidal (Figura 02) sobre a fonte, a corrente fornecida para carga possui comportamento não linear, isto é, não é puramente senoidal. Este sinal de corrente elétrica, como veremos em seguida, pode ser descrito como a soma de senóides puras com frequências múltiplas de 60Hz (quem vem a ser a frequência fundamental para este caso). Estas senóides múltiplas da frequência fundamental são as chamadas componentes harmônicas do sistema.

Para entender a geração de harmônicos, considera-se a expansão em série de Fourier. Qualquer forma de onda periódica não senoidal pode ser decomposta em uma série de ondas senoidais, que incluem a frequência fundamental e seus harmônicos. A expansão em série de Fourier é uma ferramenta matemática utilizada para expressar qualquer função periódica em uma soma de senóides (seno e cosseno) de diferentes frequências, amplitudes e fases. Esse método é fundamental no estudo de engenharia elétrica, para analisar formas de onda complexas e seus efeitos adversos em um sistema de distribuição interligado.

O conceito básico sobre a expansão em Série de Fourier é entendermos que, dada uma forma de onda periódica qualquer, chamada “f(t)”, definida no domínio do tempo, podemos escrevê-la por meio da soma das infinitas harmônicas que a compõem. Então:

$$f\ (t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n cos\ (n\omega_0 t)\ +\ b_n\ sen(n\omega_0 t)\right) \quad (5)$$

A equação (5) define a forma de onda original "f (t)" em termos de:

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos\ (n\omega_0 t))dt \quad (7)$$

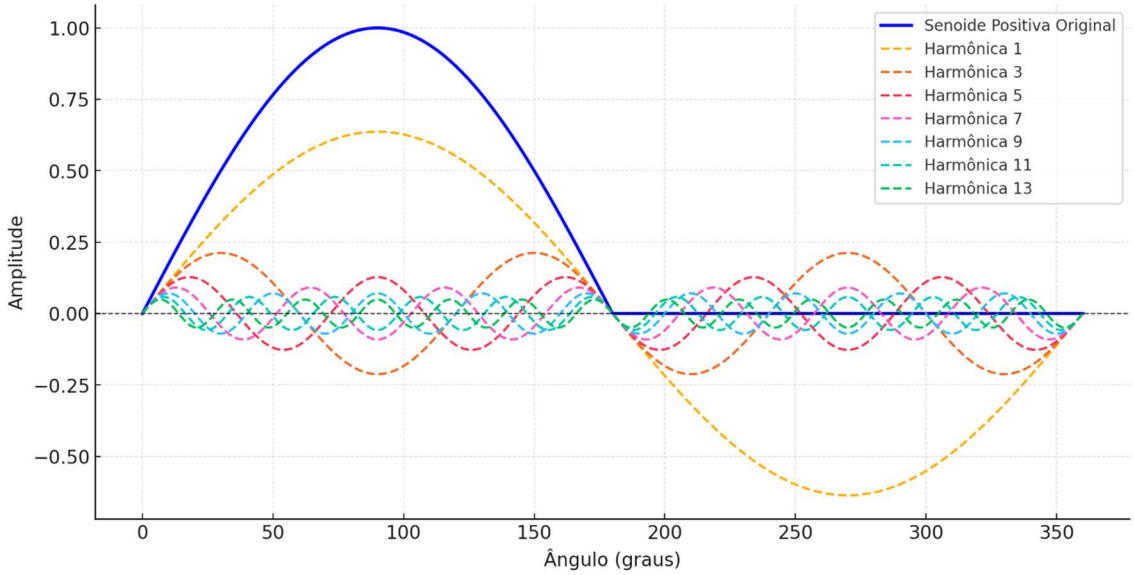
$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)(n\omega_0 t))\ dt \quad (8)$$

O termo "a_0" calculado pela equação (6) é também conhecido como componente CC (componente contínua) do sinal "f (t)". Os demais parâmetros "a_n" e "b_n", obtidos por meio das equações (7) e (8), respectivamente, são as componentes harmônicas CA (componentes alternadas). A frequência fundamental angular "ω_0" do sinal é determinada a partir do período "T". Pela seguinte relação (9):

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (9)$$

Na Figura 5, apresenta-se a forma de onda resultante de uma retificação de meia onda, juntamente com os harmônicos gerados por esse processo. Esses harmônicos, apesar de comporem a forma de onda resultante, não desempenham nenhum trabalho útil no sistema. Sua presença apenas contribui para a circulação de correntes adicionais, que se dissipam na forma de calor pelo efeito Joule. Esse comportamento exige a utilização de condutores com maior capacidade para suportar o aumento da corrente, além de ocasionar aquecimento em equipamentos conectados, reduzindo sua eficiência e comprometendo a durabilidade dos componentes do sistema elétrico.

Figura 5 - Retificação de meia onda e as harmônicas que a compõem.



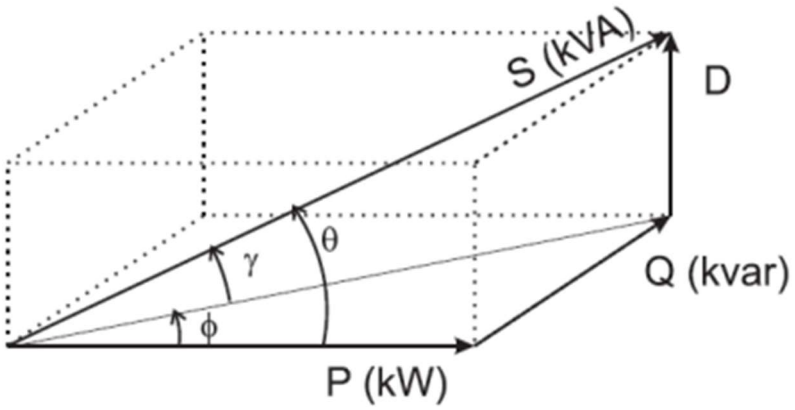
Fonte: Próprio autor, 2024.

2.4 Potência e trabalho em sistemas de tensão alternada:

A potência elétrica é um conceito fundamental para a engenharia de sistemas de energia e é essencial para entender como a eletricidade é utilizada, transmitida e distribuída. Em sistemas de corrente alternada (CA), a potência elétrica pode ser dividida em três componentes principais: potência aparente, potência ativa e potência reativa. Cada uma dessas componentes desempenha um papel distinto na operação de sistemas elétricos. A potência aparente, representada pela letra “S”, expressa em volt-ampère (VA) é a soma vetorial, vide figura 6, da potência ativa e da potência reativa. Ela representa a potência total fornecida pela fonte de energia ao sistema elétrico, tanto a componente que realiza trabalho útil, quanto a componente que apenas transita pela rede. Veremos mais à frente que apenas a harmônica fundamental, e, além disso, apenas a componente ativa da harmônica fundamental realiza trabalho em um sistema de energia elétrica. A potência ativa, representada pela letra “P”, expressa em Watts (W), é a componente responsável por realizar trabalho útil na carga. A potência reativa, representada pela letra “Q”, expressa em volt-ampère reativo (Var) é a componente da potência aparente que não realiza trabalho útil, mas é essencial para a manutenção dos campos elétricos e magnéticos nos componentes reativos do sistema, estes campos são provenientes de indutores e capacitores existentes no sistema. A corrente associada a potência reativa apenas transita pela rede sem realizar trabalho útil, como veremos à frente, sua

contribuição líquida no sistema é igual a zero, assim, apenas a corrente associada a componente ativa realiza trabalho útil no sistema.

Figura 6 - O tetraedro de potências.



Fonte: GRANDE; PB, (2013)

Em um sistema CA, a tensão ($v(t)$) e a corrente ($i(t)$) variam senoidalmente com o tempo e podem ser descritas como:

$$v\ (t) = V_{máx}\cos(\omega t) \tag{10}$$

$$i\ (t) = \left(I_{máx} cos\ (\omega t - \ \phi)\right) \tag{11}$$

Olhando para a equação (11), e para o tetraedro de potências da figura 6, o ângulo "ϕ" é o ângulo formado entre o vetor de potência aparente e o cateto adjacente, potência ativa. A soma, ou a subtração, do ângulo "ϕ" na equação (11) diz respeito ao deslocamento da corrente ser adiantado ou atrasado em relação a referencial de tensão. Para a potência total "p (t)" que flui pelo sistema, por meio da equação (12):

$$p(t) = v(t)i(t) = V_{máx}\cos(\omega t)\, I_{máx}\cos(\omega t - \ \phi) \tag{12}$$

E utilizando a seguinte identidade trigonométrica dada pela equação (13):

$$\cos(X)\cos(Y) = \frac{1}{2}\cos(X - Y) + \frac{1}{2}\cos(X + Y) \tag{13}$$

Aplicando a identidade trigonométrica apresentada pela equação (13) sobre a equação (12), obtém-se a equação (14):

$$p(t) = \frac{V_{máx} I_{máx}}{2} \cos(\phi) + \frac{V_{máx} I_{máx}}{2} \cos(2\omega t - \phi) \quad (14)$$

O resultado obtido pela equação (14) é a soma de dois termos, sendo um constante e outro com característica oscilatória. Se observarmos o comportamento desta equação para um período completo da onda, nota-se que a média para o primeiro termo será diferente de zero, enquanto a outra será igual a zero. Esta primeira parcela é a potência ativa, equação (15) e a outra, potência reativa, equação (16):

$$P(t) = \frac{V_{máx} I_{máx}}{2} \cos(\phi) \quad (15)$$

$$Q(t) = \frac{V_{máx} I_{máx}}{2} \cos(2\omega t - \phi) \quad (16)$$

Desta forma fica evidente que apenas a potência ativa “P” realiza trabalho útil sobre a carga. Porém, a corrente devido a potência reativa “Q” também está presente no sistema, aumentando as perdas por dissipação de energia térmica, exigindo condutores de dimensões adequadas para esta corrente aumentada. Minimizar os efeitos dos reativos é fundamental em engenharia elétrica, assim como a eliminação de harmônicos, como veremos em seguida. O tetraedro de potência, figura (6), é uma representação que amplia o conceito tradicional do triângulo de potência, incorporando a distorção harmônica como uma nova dimensão. Essa abordagem é fundamental para analisar sistemas elétricos com componentes não senoidais, onde as potências ativa, reativa e aparente tradicionais não são suficientes para descrever todas as características do sistema.As principais componentes do tetraedro são:

Potência ativa (P): Corresponde à energia efetivamente convertida em trabalho útil, como movimento, calor ou iluminação.

Potência reativa (Q): Relaciona-se com os campos elétricos e magnéticos necessários para o funcionamento de equipamentos como transformadores, motores e capacitores.

Potência de distorção (D): Está associada aos harmônicos presentes no sistema devido a cargas não lineares, como inversores e motores de velocidade variável. Essa potência não realiza trabalho útil, mas provoca circulação de corrente adicional que resulta em perdas térmicas e sobrecarga de componentes.

Potência aparente (S): Representa a carga total do sistema e é a resultante vetorial das potências ativa, reativa e de distorção.

Para o caso de sistemas com cargas não lineares, como em sistemas de geração fotovoltaica distribuída, é conveniente olharmos para os efeitos dos harmônicos, relacionados a potência de distorção (D), que transita pelo sistema. Definiu-se que um sinal periódico qualquer pode ser decomposto em suas infinitas componentes harmônicas, assim representadas pelas equações (17) e (18):

$$v\,(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(V_n cos\left(n\omega t + \phi_{v,n}\right)\right) \tag{17}$$

$$i\,(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(I_n cos\left(n\omega t + \phi_{i,n}\right)\right) \tag{18}$$

A integral abaixo, equação (19), mostra por meio de propriedades fundamentais do cálculo:

$$\frac{1}{T}\int_0^T \cos\left(X\omega t + \phi_{v,X}\right)\cos\left(Y\omega t + \phi_{i,Y}\right) dt = 0 \;\forall\; X \neq Y \tag{19}$$

O resultado obtido pela equação (19) mostra que, para frequências diferentes, a integração para o cálculo de potência média transferida pelo sistema será igual a zero. Em sistemas de distribuição de energia elétrica, é abordado o ideal de barramento infinito, onde idealmente a tensão é adotada como puramente senoidal, caso em que a única harmônica de tensão existente é a primeira (fundamental) com fase sobre a referência ($\phi_{v,1} = 0$), desta forma, aplicando estes conceitos a equação (20), a única componente do espectro harmônico de corrente que resulta em transferência líquida de potência para a carga é a harmônica fundamental. Assim sendo, a equação (21) delimita as soluções para a potência P(t).

$$P(t) = V_{máx,1} I_{máx,1} \frac{1}{T}\int_0^T \cos\left(\omega t + \phi_{v,1}\right)\cos\left(\omega t + \phi_{i,1}\right) dt \tag{20}$$

$$P(t) = \frac{V_{máx,1} I_{máx,1}}{2} \cos\phi_{i,1} \tag{21}$$

Embora, assim como visto para o caso de defasagem angular, existam correntes das “n” harmônicas transitando e realizando perdas econômicas para o sistema como um todo, apenas a harmônica de primeira ordem, fundamental, realizará trabalho útil sobre a carga. Engenheiros por todo o mundo trabalham incansavelmente desenvolvendo técnicas de filtragem de harmônicos e compensação de reativos, para que a geração por meio de

fontes sustentáveis, que vêm ano após ano aumentando (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, (2023)), possam se tornar uma realidade realmente sustentável e confiável para o sistema de distribuição.

2.5 O fator de potência:

O fator de potência (FP), dado pela equação (22), é uma medida da eficiência com que a energia elétrica é convertida em trabalho útil. Ele é definido como a razão entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S):

$$FP = \frac{P}{S} \tag{22}$$

O fator de potência pode variar de 0 a 1, onde um valor próximo de 1 indica que a maior parte da potência fornecida é utilizada para realizar trabalho útil, enquanto valores menores indicam maior presença de potência reativa e, ou, distorções harmônicas.

O fator de potência pode estar ligado tanto a defasagem quanto a presença de harmônicos no sistema. Para o caso do fator de potência atrelado a defasagem, é ignorada a presença de harmônicos e avaliado apenas o ângulo entre a potência ativa "P" e a potência aparente "S". Dado pela equação (23):

$$FP_{deslocamento} = \cos(\phi_1) \tag{23}$$

No entanto, em sistemas reais, especialmente com cargas não lineares, a corrente pode conter harmônicas que distorcem a forma de onda, e o cálculo do fator de potência precisa considerar essas distorções. Para isso, é utilizado o cálculo do THDi ("*Total Harmonic Distortion of Current*"), em português, distorção harmônica total de corrente. Este cálculo expressa a relação entre a fundamental e as demais presentes no sistema. O THD, ou Distorção Harmônica Total, é uma métrica que quantifica o nível de distorção em uma forma de onda elétrica em relação à sua componente fundamental. Ele mede a contribuição dos harmônicos (frequências múltiplas da frequência fundamental) em uma forma de onda, indicando o quanto ela está desviada de uma senóide pura. Nas correntes puramente senoidais, o THDi vem a ser igual a zero, e quanto mais a relação cresce, mais poluído será o sistema. Dado assim pela equação (24):

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (24)$$

Sendo assim, calcula-se o fator de potência associado às harmônicas de acordo com a equação (25):

$$FP_{harmônicas} = \frac{1}{\sqrt{1 + THDi^2}} \quad (25)$$

Pode-se agora, então, calcular o fator de potência total do sistema "FP_{total}", dado pela equação (26):

$$FP_{total} = FP_{deslocamento} FP_{harmônicas} = \frac{cos\,(\phi_1)}{\sqrt{1 + THDi^2}} \quad (26)$$

Este conceito será abordado mais à frente neste trabalho durante a análise dos resultados obtidos em campo.

2.6 Análise de fluxo de potência:

A análise de fluxo de potência envolve resolver um conjunto de equações não lineares que descrevem o equilíbrio de potência em cada barramento do sistema de potência. Esta análise é uma ferramenta fundamental em engenharia elétrica para avaliar a operação dos sistemas, permitindo determinar as tensões, correntes e fluxos de potência em todos os componentes de um sistema sob condições de operação estáveis. Com o crescente uso de fontes de Geração Distribuída (GD) e o consumo variado das unidades consumidoras, a análise de fluxo de potência torna-se ainda mais crucial para garantir a eficiência e a confiabilidade da rede elétrica.

A Geração Distribuída refere-se à produção de eletricidade a partir de várias fontes de energia de pequeno a médio porte localizadas próximas aos pontos de consumo. Exemplos incluem unidades fotovoltaicas, turbinas eólicas, pequenas usinas hidrelétricas. Em um sistema tradicional, a potência flui das grandes usinas geradoras para as cargas. Com a GD, a geração ocorre próxima às cargas, alterando o padrão de fluxo de potência, que pode se tornar bidirecional (há tanto o consumo, quanto a injeção de potência elétrica

no sistema). A GD pode reduzir as perdas na rede, pois a energia é gerada e consumida localmente, diminuindo a necessidade de transmitir potência por longas distâncias. Este tipo de geração pode ajudar, também, na regulação de tensão ao longo do sistema. No entanto, injeções excessivas de potência podem causar elevações de tensão, o que precisa ser gerenciado adequadamente. Essa injeção excessiva de potência será discutida mais à frente neste trabalho.

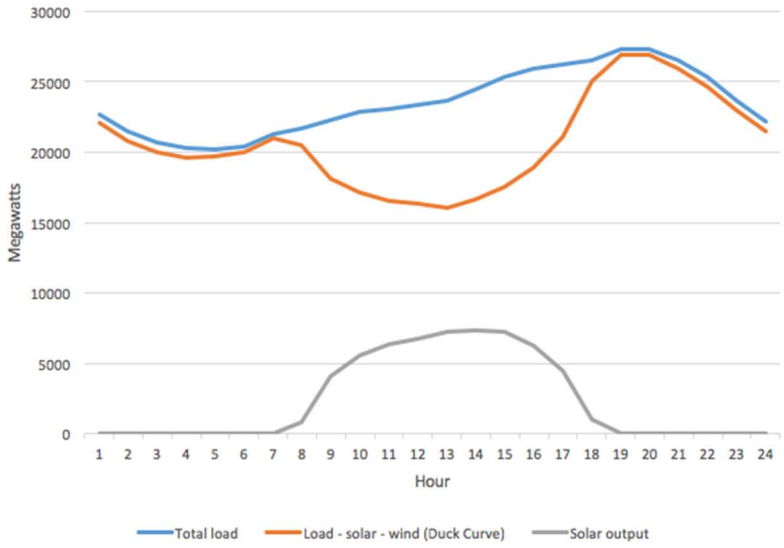
2.7 A Curva do pato:

A curva do pato em sistemas com inversão do fluxo de potência ocorre de maneira similar à curva tradicional, mas com uma particularidade adicional devido à alta penetração de energia solar. Durante o dia, especialmente nas horas de maior insolação, a geração de energia solar pode exceder significativamente a demanda local de energia. Isso resulta em um fluxo de potência reverso, onde o excesso de energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos não é consumido localmente, mas sim exportado de volta para a rede elétrica.

No gráfico da curva do pato, essa inversão de fluxo de potência se manifesta durante o período de menor demanda (o "vale" da curva), geralmente no início da tarde. Aqui, em vez de a rede estar fornecendo energia para os consumidores, os sistemas fotovoltaicos estão enviando energia para a rede. Isso não apenas acentua o vale da curva, mas também pode criar desafios de estabilidade e gestão para o sistema elétrico, pois a rede precisa lidar com a injeção dessa energia em momentos em que a demanda é baixa.

Quando o sol começa a se pôr e a geração solar diminui rapidamente, o fluxo de potência volta ao normal, com a rede suprindo a energia necessária para atender à demanda crescente das cargas, levando à rápida ascensão da curva no final da tarde e início da noite. Esse comportamento ressalta a importância de estratégias como armazenamento de energia e controle avançado de carga para gerenciar a inversão do fluxo de potência e manter a estabilidade da rede.

Figura 7 - Medição horária de carga elétrica descontadas gerações eólica e solar, California, 22 de outubro de 2016.



Fonte: (CALIFORNIA ISO, 2016)

A figura 7 representa o balanço energético entre demanda de consumo e oferta de energia elétrica geradas por fontes renováveis, no caso ilustrado são elas solar e eólica. A curva azul representa a demanda de consumo ao longo do dia 22 de outubro de 2016 no estado da Califórnia, Estados Unidos da América. Subtraindo a potência gerada por fontes solar e eólica, descritas pela curva alaranjada, representando a demanda que deve ser suprida pelas demais fontes de energia elétrica, tais como combustíveis fósseis, hidrelétricas, termonucleares, entre outras. Em primeira mão isso não aparenta ser um problema, afinal reduzir-se a dependência de fontes não renováveis é o grande objetivo da indústria eólica e fotovoltaica. O problema surge quando projetamos um cenário em que não haja demanda suficiente para tamanha geração, e ao contrário das fontes convencionais de geração, não é tão simples interromper-se o fornecimento de potência para equilibrar demanda e fornecimento. Este fenômeno é a chamada inversão do fluxo de potência, em que determinado sistema fornece além da demanda local. Essa injeção sobressalente de potência pode até mesmo superar as capacidades nominais do sistema, resultando em interrupções por equipamentos de proteção, sobrecargas nos

transformadores, elevação dos níveis de tensão em turbo geradores síncronos dada a baixa demanda líquida. Este estudo busca analisar o fenômeno da inversão do fluxo de potência e observar a curva do pato em uma unidade industrial com uma grande usina de geração fotovoltaica.

2.8 Sistemas fotovoltaicos:

A topologia de um sistema fotovoltaico envolve a organização dos componentes elétricos e eletrônicos que permitem a conversão da energia solar em eletricidade utilizável, seja em corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). A diferença entre CC e CA desempenha um papel crucial no design e na operação desses sistemas.

Os painéis solares são compostos por várias células fotovoltaicas conectadas em série e/ou em paralelo. Cada célula fotovoltaica gera energia na forma de corrente contínua (CC) quando exposta à luz solar. A razão pela qual os painéis solares produzem CC é que as células fotovoltaicas geram um fluxo unidirecional de elétrons, resultando em um fluxo constante de corrente elétrica em uma única direção.

A maioria dos dispositivos elétricos e as redes elétricas domésticas/comerciais operam com corrente alternada (CA). Portanto, a corrente contínua gerada pelos painéis solares precisa ser convertida em CA. Os inversores são componentes essenciais em sistemas fotovoltaicos, responsáveis por converter a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA), que é utilizada em dispositivos elétricos e na rede elétrica. Existem diferentes tipos de inversores, como centrais, *string*, microinversores e híbridos, cada um adequado para aplicações específicas. Além da conversão de CC para CA, os inversores realizam a sincronização com a rede elétrica, otimizam a produção de energia por meio do MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), oferecem proteção e segurança ao sistema, e permitem monitoramento e controle em tempo real. A eficiência dos inversores é crucial, variando geralmente entre 95% e 99%, e sua escolha deve considerar fatores como capacidade, compatibilidade, condições ambientais, e suporte técnico.

Em sistemas fotovoltaicos off-grid, que não estão conectados à rede elétrica, a energia excedente gerada pelos painéis solares é armazenada em baterias. O controlador de carga é o componente que regula a carga e descarga das baterias para evitar sobrecarga ou descarga profunda, protegendo assim a vida útil das baterias e mantendo a segurança na operação do sistema, prevenindo contra incêndios e explosões.

Os sistemas fotovoltaicos são uma forma sustentável de gerar eletricidade a partir da luz solar, e eles podem ser classificados em duas categorias principais: *on-grid* e *off-grid*. A diferença entre esses sistemas está na forma como a energia gerada é gerida e utilizada.

O sistema fotovoltaico *on-grid*, também conhecido como conectado à rede, é aquele que está diretamente ligado à rede elétrica pública. Nesse tipo de sistema, os painéis solares captam a energia do sol e a convertem em eletricidade, que é enviada para um inversor. O inversor converte a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis em corrente alternada (CA), que é compatível com a rede elétrica.

A energia gerada pode ser consumida diretamente pelos equipamentos conectados à rede interna do usuário. Quando a geração de energia solar é maior que o consumo, o excedente é injetado na rede elétrica pública, e o usuário recebe créditos de energia que podem ser usados em momentos em que o sistema não está gerando energia suficiente (como à noite ou em dias nublados). Isso é conhecido como "sistema de compensação de energia" ou *"net metering"*.

2.9 Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável:

Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela ONU(NAÇÕES UNIDAS, (2024)), são um chamado global à ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que todas as pessoas desfrutem de paz e prosperidade até 2030. Eles abrangem uma ampla gama de áreas cruciais:

1) Erradicação da Pobreza;
2) Fome Zero e Agricultura Sustentável;
3) Saúde e Bem-Estar;
4) Educação de Qualidade;
5) Igualdade de Gênero;
6) Água Potável e Saneamento;
7) Energia Limpa e Acessível;
8) Trabalho Decente e Crescimento Econômico;
9) Indústria, Inovação e Infraestrutura;
10) Redução das Desigualdades;
11) Cidades e Comunidades Sustentáveis;
12) Consumo e Produção Responsáveis;

13) Ação contra a Mudança Global do Clima;
14) Vida na Água;
15) Vida Terrestre;
16) Paz, Justiça e Instituições Eficazes;
17) Parcerias e Meios de Implementação.

A qualidade de energia elétrica está intimamente relacionada a esses objetivos por meio da promoção do desenvolvimento tecnológico e da eficiência no uso de recursos energéticos. Um fornecimento estável e eficiente de energia elétrica é essencial para o ODS 7, garantindo energia limpa e acessível. A inovação tecnológica aplicada à qualidade de energia, como a mitigação de distorções harmônicas, o controle de tensão e a compensação de potência reativa, contribui diretamente para o ODS 9, promovendo infraestrutura resiliente e sustentável.

A eficiência energética e o uso racional de recursos refletem o ODS 12, ao evitar desperdícios e maximizar o aproveitamento dos sistemas de geração e consumo, enquanto a redução de perdas elétricas e a utilização de fontes renováveis, como a solar, têm impacto direto no ODS 13, ao mitigar mudanças climáticas. Além disso, a confiabilidade da energia elétrica possibilita o funcionamento de hospitais (ODS 3), escolas (ODS 4) e indústrias (ODS 8), fortalecendo a infraestrutura e promovendo o desenvolvimento socioeconômico sustentável.

Portanto, investir em tecnologias que assegurem uma qualidade de energia superior não apenas promove eficiência e reduz custos, mas também se alinha aos 17 ODS, demonstrando que o avanço técnico e o compromisso ambiental podem caminhar juntos para a construção de um futuro mais equilibrado e inclusivo.

2.10 Considerações finais

Lançando mão dos saberes até aqui apresentados, serão analisados dados de medição realizados em unidade fabril da Volga Engenharia, Avenida Elmar Arantes Parque Industrial Vice-Presidente José de Alencar, Aparecida de Goiânia - GO. Observar o momento em que ocorre a inversão do fluxo de potência é fundamental para que sejam propostas medidas de mitigação do problema enfrentado. O mundo moderno e suas revoluções tecnológicas, tanto para geração quanto para o consumo, requer um uso

inteligente da engenharia e da logística para que o fim de uma sociedade mais sustentável e ecologicamente viável seja cada vez mais visível.

3 METODOLOGIA

Este presente capítulo ficará responsável por descrever como foram realizadas medições e extração dos dados armazenados nos multimedidores de grandezas elétricas. No decorrer do capítulo, fundamentados pelo capítulo anterior de revisão teórica, serão apresentadas técnicas, parâmetros, e fórmulas atuaram na construção do estudo. Este capítulo busca trazer luz sobre a estrutura do estudo e a possível replicabilidade pelo leitor.

A metodologia abordada pelo estudo seguirá o apresentado pelo fluxograma abaixo:

1. Início

2. Definir Objetivo da Medição (Ex.: Medir distorções harmônicas, tensão, corrente, fator de potência, potência demandada, potência fornecida etc.);

3. Identificar Pontos de Medição (Seleção dos locais na rede elétrica onde serão realizadas as medições por meio dos diagramas unifilares e trifilares, plantas de locação etc.);

4. Selecionar Instrumentos de Medição (Escolher medidores TRUE RMS, analisadores de qualidade de energia, precisão e capacidade de armazenamento etc.);

5. Calibrar e Configurar os Equipamentos (Configuração dos parâmetros corretos: frequência, tensão nominal, configurar a relação de transformação dos transformadores de corrente etc.);

6. Realizar a Medição (Coleta de dados como harmônicos, tensão, corrente, distorção de forma de onda etc.);

7. Analisar os Dados Coletados (Comparar os dados com os limites normativos, analisar o percentual de geração em relação a demanda etc.);

8. Relatório com proposta de solução (Descrever resultados, identificar problemas e sugerir correções quando possível).

A seguir serão detalhados os passos do fluxograma utilizado para realização do estudo:

3.1 Início

O processo de medição de parâmetros de qualidade de energia elétrica se torna particularmente relevante em cenários onde há elevada penetração de geração distribuída de energia solar, como evidenciado pela problemática da Curva do Pato. Essa curva descreve a variação na demanda de energia ao longo do dia, com uma forte queda no consumo durante o período de maior geração solar (durante o dia) e um aumento abrupto no início da noite, quando a geração solar cessa e a demanda residencial e comercial aumenta. Esse comportamento gera desafios para a gestão da rede elétrica, resultando em possíveis inversões no fluxo de potência e flutuações na qualidade da energia.

Medições adequadas, focadas em tensões, correntes, harmônicos e fator de potência, são essenciais para monitorar e mitigar os impactos negativos dessa dinâmica, garantindo a estabilidade e eficiência da rede elétrica. Entender o que se busca enxergar nessa etapa é fundamental, para que sejam empregados os ferramentais de cálculo e medição adequados. É de grande valia listarem-se os problemas enfrentados pela instalação, sejam eles quedas de energia, queima de equipamentos, ruídos, fugas de corrente, entre outros.

3.2 Definir objetivos para a medição:

Na definição do objetivo da medição, é crucial considerar os impactos causados pela geração distribuída de energia solar particularmente relacionados à Curva do Pato. O objetivo principal pode incluir a análise da qualidade de energia em momentos críticos, como o período de transição entre o fim da tarde e o início da noite, quando ocorre a maior variação de carga e a inversão do fluxo de potência. Parâmetros como distorções

harmônicas, flutuações de tensão, variações de corrente e o fator de potência devem ser monitorados, especialmente durante os horários de pico de demanda.

A medição visa identificar desequilíbrios na rede e antecipar problemas operacionais, fornecendo dados para ações corretivas que garantam a estabilidade do sistema elétrico em redes com alta penetração de energia solar. Para estudos de qualidade de energia, como é o caso da análise da curva do pato, é de grande importância realizar medições de potência, tanto demandada pelos usuários finais, quanto para potências fornecidas pelas centrais de geração alternativas, como é o caso, por exemplo, da eólica e solar.

O uso de equipamentos incompatíveis, ou não homologados, pode mascarar e desqualificar os dados de medição, escolher adequadamente o equipamento analisador é fundamental para o sucesso do estudo como um todo. Na escolha dos analisadores de energia, é essencial utilizar equipamentos capazes de realizar medições precisas e abrangentes, especialmente em redes com alta penetração de geração solar, afetadas pela Curva do Pato. Analisadores de qualidade de energia devem ser capazes de medir parâmetros críticos como distorções harmônicas, flutuações de tensão, corrente, e fator de potência em tempo real. A capacidade de medir valores TRUE RMS é fundamental para garantir precisão, uma vez que as formas de onda podem estar significativamente distorcidas. Uma medida TRUE RMS é uma técnica de medição que calcula o valor real da corrente ou tensão elétrica em um circuito, independentemente da forma de onda. Enquanto medições convencionais assumem formas de onda perfeitamente senoidais, o método TRUE RMS considera a presença de distorções ou variações na forma de onda causadas por cargas não lineares, como inversores, motores controlados eletronicamente e outros dispositivos que introduzem harmônicos no sistema. Em sistemas modernos com formas de onda distorcidas, a medição TRUE RMS é essencial para garantir precisão e confiabilidade, diferentemente de medidores tradicionais que podem subestimar ou superestimar os valores devido à incapacidade de lidar com tais distorções. Além disso, os analisadores devem ter a capacidade de registrar eventos transientes e fornecer dados contínuos ao longo do dia, para capturar as rápidas variações de carga e inversão de fluxo de potência que ocorrem durante os horários de transição. A escolha de equipamentos com essas funcionalidades garante uma análise detalhada e confiável da qualidade da energia.

3.3 Identificar pontos de medição:

A definição dos pontos de medição é uma etapa crítica para garantir a coleta de dados relevantes sobre a qualidade da energia em redes com geração distribuída solar. Os pontos de medição devem ser estrategicamente escolhidos em locais onde a variação de carga e a inversão de fluxo de potência são mais significativas, como em subestações, ramais de distribuição e locais próximos às fontes de geração fotovoltaica

Pontos de interseção entre áreas de alta geração solar e de grande consumo de energia durante o final do dia são essenciais para capturar as variações dinâmicas que ocorrem durante a transição de baixa demanda (meio-dia) para os picos noturnos. Além disso, é importante selecionar locais onde a presença de cargas não lineares possa introduzir distorções harmônicas, para uma avaliação completa dos impactos no sistema elétrico. Uma seleção cuidadosa dos pontos de medição garante que os dados coletados refletem as condições reais e ajudem a identificar possíveis intervenções necessárias para manter a estabilidade da rede.

Para auxiliar na definição precisa dos pontos de medição, o uso de diagramas unifilares é fundamental. Estes diagramas representam de forma simplificada a estrutura da rede elétrica, incluindo as conexões entre geradores, transformadores, linhas de transmissão e cargas.

Com base no diagrama unifilar, é possível identificar com clareza os pontos críticos do sistema, como interseções entre a geração solar distribuída e a rede de distribuição convencional, onde ocorrem as inversões de fluxo de potência. O diagrama também facilita a localização de componentes sensíveis a distúrbios elétricos, como harmônicos e variações de tensão, orientando a escolha de pontos estratégicos para a instalação dos analisadores de energia. Utilizar diagramas unifilares na fase de planejamento das medições garante uma visão abrangente do sistema elétrico, contribuindo para uma análise mais eficiente e completa da qualidade de energia.

O estudo realizado com o objetivo de se observar os efeitos da inversão do fluxo de potência, como a curva do pato, requer que a medição seja feita diretamente no ramal de entrada da instalação, no qual há a instalação da medição bidirecional. O ramal de entrada é o ponto onde a energia proveniente da rede de distribuição interage diretamente com a instalação, sendo o local ideal para observar as variações de fluxo de potência que ocorrem ao longo do dia.

Durante o pico de geração solar, pode ocorrer uma inversão do fluxo de potência, com a energia sendo exportada para a rede elétrica. No entanto, à medida que a produção solar diminui ao final da tarde, a demanda por energia da rede convencional aumenta drasticamente, criando desafios de estabilidade. A medição nesse ponto permite capturar com precisão esses eventos de inversão e as flutuações associadas, como variações na tensão e corrente, bem como a presença de harmônicos gerados por equipamentos conectados. Esses dados são essenciais para avaliar a capacidade da rede de lidar com a dinâmica imposta pela geração distribuída, possibilitando a identificação de medidas corretivas para manter a qualidade da energia e a confiabilidade do sistema.

Em alguns casos pode ser interessante realizar medições localizadas em ramais específicos da rede. Ramais para alimentação de motores acionados por inversores de frequência, retificadores carregadores de bateria, sistemas de energia ininterrupta de corrente alternada, podem ser grandes agentes prejudiciais para um bom THD (ou segundo o PRODIST, DTT) nos sistemas elétricos.

3.4 Selecionar instrumentos:

Para realizar medições precisas em sistemas com geração distribuída, especialmente em estudos sobre a inversão do fluxo de potência, é fundamental selecionar medidores com características específicas que atendam às exigências de qualidade de energia e homologação das agências regulamentadoras locais Módulo 8 PRODIST (ANEEL, (2022)) e IEC 61000-4-30 (IEC, (2021)). Os principais tipos de medidores usados nessas análises são os analisadores de qualidade de energia, medidores TRUE RMS e registradores de dados.

- Analisadores de Qualidade de Energia: Esses dispositivos são projetados para medir uma ampla gama de parâmetros elétricos, como tensão, corrente, potência (ativa, reativa e aparente), fator de potência, harmônicos e transientes. No contexto da inversão de fluxo de potência, esses analisadores são essenciais, pois conseguem medir a potência fluindo em ambas as direções, da rede para a instalação e vice-versa. Além disso, analisadores mais avançados podem registrar dados por longos períodos, permitindo observar mudanças na rede ao longo do dia, como durante os picos de geração solar e o aumento da demanda ao entardecer.

- Medidores TRUE RMS: Esses medidores são fundamentais para capturar formas de onda distorcidas que podem surgir em sistemas com geração distribuída, onde cargas não lineares e inversores de energia solar são comuns. Ao contrário dos medidores convencionais, que podem subestimar os valores medidos em ondas não senoidais, os medidores TRUE RMS fornecem leituras precisas da tensão e corrente real, independentemente das distorções. Isso é crucial em redes afetadas por harmônicos, que frequentemente surgem devido ao uso de inversores solares.
- Sensores Bidirecionais de Potência: Para medir corretamente a inversão do fluxo de potência, os analisadores devem ser equipados com sensores bidirecionais, capazes de detectar e medir a potência fluindo tanto para dentro quanto para fora da instalação. Esses sensores permitem identificar o momento exato em que a geração solar excede a demanda local, fazendo com que o excedente seja exportado para a rede, assim como quando a instalação volta a consumir energia da rede externa.
- Registradores de Dados: Além de medir parâmetros em tempo real, o uso de registradores de dados é essencial para monitorar a rede ao longo de vários dias ou semanas, capturando as variações sazonais e de carga. Esses dispositivos permitem a coleta contínua de dados sobre tensão, corrente, potência e harmônicos, criando um histórico detalhado que pode ser utilizado para detectar padrões de inversão de fluxo e identificar momentos críticos para a qualidade da energia.
- Compatibilidade com Análise de Harmônicos: Como a presença de harmônicos pode influenciar diretamente o comportamento da rede, especialmente em sistemas com inversores fotovoltaicos, é importante que os medidores selecionados possam realizar uma análise completa de distorções harmônicas ("*Total Harmonic Distortion*" - THD) e identificar quais frequências harmônicas específicas estão presentes. Isso permite uma avaliação detalhada dos impactos na qualidade da energia e facilita a implementação de medidas corretivas, como filtros de harmônicos.
- Interfaces de Comunicação e *Software*: Medidores modernos geralmente possuem interfaces de comunicação, como Ethernet, Wi-Fi ou USB, permitindo que os dados sejam transmitidos em tempo real para sistemas de

monitoramento ou softwares especializados. Esses softwares podem gerar relatórios detalhados sobre a inversão de potência, variações de tensão e corrente, além de análises preditivas que auxiliam na manutenção preventiva e no gerenciamento da rede.

3.5 Calibrar e configurar os equipamentos

A correta calibração e configuração dos equipamentos de medição é um passo fundamental para garantir a precisão dos dados coletados em estudos de qualidade de energia, especialmente ao observar fenômenos como a inversão do fluxo de potência. A calibração consiste em ajustar os instrumentos para que eles forneçam medições exatas de acordo com padrões normativos e boas práticas de engenharia. Isso garante que os valores medidos, como tensão, corrente e potência, estejam dentro dos limites aceitáveis de erro. A frequência do sistema (60 Hz no Brasil) precisa ser configurada corretamente, assim como a tensão nominal do sistema, para que o equipamento esteja sintonizado com as características da rede.

Na configuração dos analisadores de qualidade de energia, é importante ajustar os intervalos de medição adequados, como a resolução temporal para capturar eventos rápidos de inversão de fluxo ou transientes. Definir corretamente os parâmetros de medição, como limites de harmônicos e faixas de tensão, é crucial para capturar as flutuações de maneira precisa. Além disso, é necessário garantir que os sensores bidirecionais estejam configurados para detectar o fluxo de potência em ambas as direções.

Outra etapa importante é a verificação periódica dos cabos de conexão, garras de corrente e terminais para assegurar que não haja interferências ou perdas nos sinais medidos. Após a configuração, deve-se realizar uma calibração de campo para verificar se o instrumento está funcionando corretamente em condições reais de operação, ajustando conforme necessário. Esse processo garante que as medições sejam precisas e confiáveis ao longo do estudo.

3.6 Realizar a medição

Durante o processo de medição, é essencial realizar o acompanhamento contínuo para garantir a precisão e confiabilidade dos dados coletados. Um dos pontos mais críticos

a monitorar é o funcionamento adequado das garras de corrente, que são responsáveis por medir a intensidade da corrente elétrica nos condutores. Qualquer desalinhamento, má fixação ou acúmulo de sujeira nas garras pode gerar leituras imprecisas ou falhas nos dados, especialmente em sistemas onde ocorrem inversões no fluxo de potência, como em redes com geração solar distribuída. Além disso, o acompanhamento permite detectar interrupções na medição, que podem ser causadas por falhas de comunicação entre os medidores e o sistema de coleta de dados, problemas de alimentação elétrica dos equipamentos ou interferências eletromagnéticas.

Ao longo do processo de medição, é recomendado inspecionar fisicamente as conexões dos medidores e garantir que não haja sinais de superaquecimento ou desgastes nas garras de corrente. Também é importante realizar testes periódicos de continuidade e verificar se os parâmetros configurados estão sendo registrados corretamente. O acompanhamento ativo ajuda a prevenir a perda de dados críticos, permite a correção de falhas em tempo real e assegura que os resultados obtidos reflitam com precisão o comportamento do sistema elétrico, incluindo eventos como a inversão de potência.

Variáveis como temperatura ambiente, vibrações mecânicas e interferências eletromagnéticas podem afetar a precisão dos sensores e causar desvios nas leituras. Acompanhar a medição em tempo real também permite identificar flutuações anormais nos parâmetros, como picos inesperados de corrente ou quedas de tensão, que podem indicar problemas no sistema, falhas de dispositivos ou mesmo erros na instalação dos sensores. No caso de redes com geração distribuída, como as alimentadas por energia solar, a inversão do fluxo de potência pode acontecer de forma intermitente ou em momentos não previstos, e o acompanhamento constante possibilita capturar esses eventos com mais precisão. Além disso, o monitoramento contínuo garante que quaisquer anomalias possam ser imediatamente identificadas e corrigidas, minimizando o impacto sobre a qualidade dos dados e prevenindo a necessidade de repetição das medições, o que pode ser custoso em termos de tempo e recursos. O trabalho deve sempre estar alinhado ao que regem as normas e padrões locais normativos, como o caso das Regras e Procedimentos de Distribuição (PRODIST, 2020). O PRODIST recomenda que para este tipo de estudo sejam realizadas medições com duração de pelo menos uma semana ininterrupta.

3.7 Analisar os dados coletados

A extração dos dados dos analisadores de energia é uma etapa crítica que garante a disponibilização das informações registradas para análise detalhada. Após o período de medição, os dados são armazenados na memória interna dos dispositivos e precisam ser extraídos de forma segura e eficiente. A maioria dos analisadores de energia modernos possui interfaces de comunicação como USB, *Ethernet*, *Wi-Fi*, *Bluetooth* ou *SD card*, que facilitam o processo de transferência para um computador ou servidor central.

Dependendo da aplicação, a extração pode ser feita manualmente, conectando diretamente os dispositivos a um computador, ou de forma automática, enviando os dados em tempo real para sistemas de monitoramento via protocolos como Modbus, OPC ou DNP3. Durante a extração, é importante garantir que todos os dados foram transferidos corretamente e verificar se não houve perda de informações devido a falhas de comunicação ou interrupções no armazenamento.

Os dados extraídos podem incluir valores instantâneos de tensão, corrente, potência, distorções harmônicas e transientes. Após a transferência, os arquivos são frequentemente exportados em formatos como CSV, *Excel* ou diretamente para softwares especializados de análise de qualidade de energia, onde serão processados para a geração de relatórios e diagnósticos. Uma extração precisa e eficiente dos dados é essencial para assegurar que todas as medições realizadas sejam devidamente aproveitadas para a avaliação das condições da rede elétrica.

3.8 Relatório e proposta de solução

Tendo em mãos dados extraídos dos analisadores de energia, e com as devidas análises, gráficos, simulações feitas, pode ser desenvolvido assim um relatório sobre as condições do sistema elétrico estudado. A partir deste relatório podem ser tomadas medidas mitigadoras dos problemas revelados pelo estudo. O relatório deve conter dados de referência e dados medidos localmente.

3.9 Considerações finais

Este capítulo destacou a importância de uma metodologia bem estruturada para o sucesso do estudo realizado. O uso do fluxograma como ferramenta de planejamento organizou de forma lógica as etapas essenciais, desde a escolha dos equipamentos até a análise dos resultados. Essa abordagem facilitou a identificação de interdependências

entre as atividades e proporcionou maior clareza na execução do trabalho, garantindo que os objetivos fossem perseguidos de maneira eficiente e consistente. O método adotado não apenas contribuiu para a condução sistemática do estudo, mas também estabeleceu uma base sólida para interpretações confiáveis e soluções direcionadas aos desafios enfrentados, alinhando o trabalho às melhores práticas acadêmicas e profissionais.

4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo são apresentados os detalhes práticos da aplicação metodológica previamente descrita, concentrando-se no estudo de caso realizado com o intuito de analisar as condições de qualidade da energia em redes elétricas. Tendo como base os procedimentos delineados no fluxograma de medição e análise, e fundamentados nos princípios teóricos discutidos anteriormente, esta seção aprofunda-se na prática de coleta, tratamento e interpretação dos dados extraídos do analisador de grandezas elétricas.

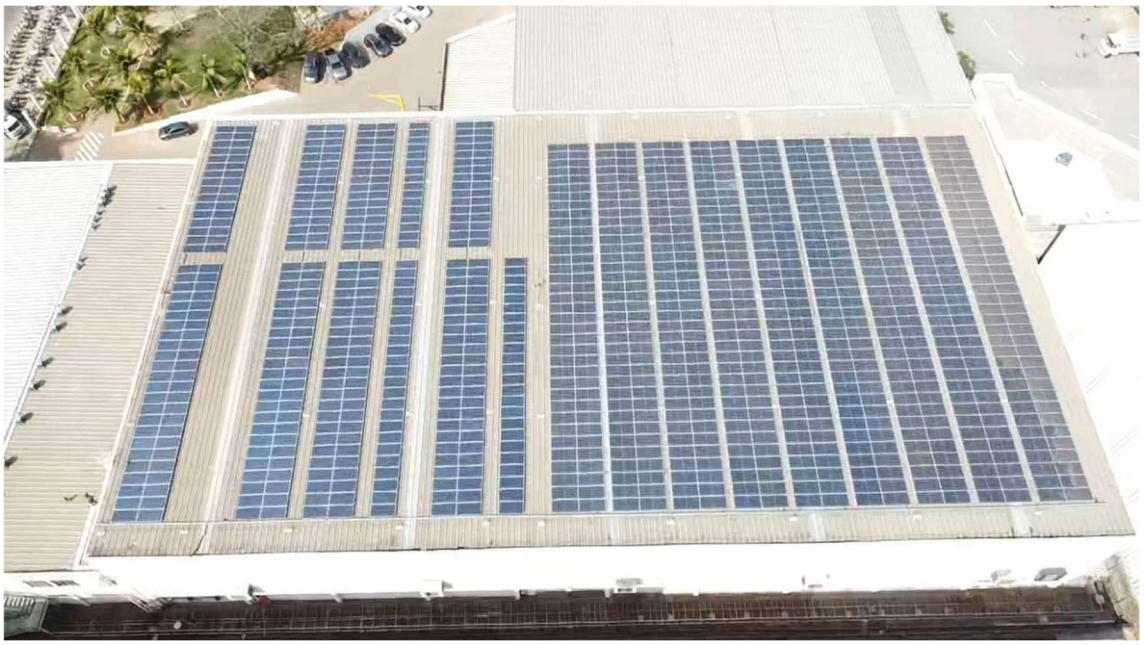
4.1 Início:

O estudo de caso será realizado na Volga Engenharia, uma renomada e sólida indústria especializada na fabricação de painéis elétricos e unidades de Eletrocentro, localizada em Aparecida de Goiânia. Atuando em projetos de destaque no cenário industrial brasileiro, a Volga se diferencia pela sua capacidade de atender a demandas técnicas específicas e pela contribuição em iniciativas de grande impacto e pioneirismo. Seus projetos vão além do fornecimento de equipamentos, abrangendo também soluções completas em infraestrutura elétrica e automação para diversos setores da economia brasileira. A Volga abrange desde o setor alimentício até os setores de mineração, petróleo, e gás, sempre alinhados junto, aos seus parceiros, com os avanços tecnológicos e as melhores práticas de engenharia e sustentabilidade.

A unidade em análise possui uma planta de geração fotovoltaica de 300 kWp (figura 8), que representa um investimento relevante em energias renováveis, reforçando o compromisso da Volga com a inovação e a eficiência energética. A presença deste sistema de geração distribuída agrega complexidade à análise de qualidade de energia e ao controle do fluxo de potência, aspectos essenciais no estudo de fenômenos que podem impactar a estabilidade e o desempenho da infraestrutura elétrica. Com isso, o caso da

Volga Engenharia oferece um cenário ideal para investigar detalhadamente as interações entre sistemas de geração distribuída e a rede elétrica, evidenciando a importância de monitoramentos precisos e adequados para garantir a confiabilidade e a sustentabilidade no fornecimento de energia.

Figura 8 - Imagem aérea de usina fotovoltaica 300kWp da Volga Engenharia



Fonte: VOLGA ENGENHARIA, (2024)

Ao longo deste capítulo, são examinados os objetivos específicos da medição, a seleção e configuração dos instrumentos, o monitoramento dos pontos críticos de medição e a análise dos dados. O objetivo é fornecer uma visão detalhada sobre como as medições foram realizadas em locais estratégicos, além de destacar o uso de técnicas e parâmetros relevantes para avaliar o impacto da geração distribuída. Esse estudo busca, assim, não apenas evidenciar a aplicabilidade do método, mas também oferecer um guia replicável para futuras análises de qualidade da energia elétrica.

Este capítulo seguirá o fluxograma delineado no Capítulo 3, aplicando cada etapa da metodologia proposta para garantir uma análise completa e estruturada da qualidade de energia elétrica. Desde a definição dos objetivos de medição até a elaboração do relatório final, cada fase do fluxograma será implementada com o intuito de promover a replicabilidade do estudo. Dessa forma, este capítulo abordará a prática dos processos descritos, incluindo a identificação de pontos de medição, seleção e calibração de

equipamentos, execução das medições e análise dos dados coletados, promovendo uma compreensão aprofundada da aplicação dos métodos no contexto específico do estudo de caso.

4.2 Definir objetivos para a medição:

Neste estudo, o objetivo é realizar uma análise detalhada da dinâmica de inversão do fluxo de potência, especialmente em cenários com geração distribuída, como a solar, e suas interações com a demanda de potência. Será avaliado a relação entre a geração local e a curva de potência demandada, verificando a ocorrência e intensidade da inversão do fluxo de potência. Além disso, será analisada a distorção harmônica presente tanto na tensão quanto na corrente, um fator crítico que pode comprometer a qualidade da energia fornecida. Também serão monitorados o fator de potência, como indicador da eficiência energética, e as condições da tensão e corrente no condutor neutro, fundamentais para garantir a segurança e a estabilidade do sistema. Esses parâmetros permitirão um diagnóstico completo dos impactos causados pela geração distribuída sobre a qualidade de energia, oferecendo informações valiosas para estratégias de mitigação de problemas e para a manutenção da confiabilidade da rede elétrica.

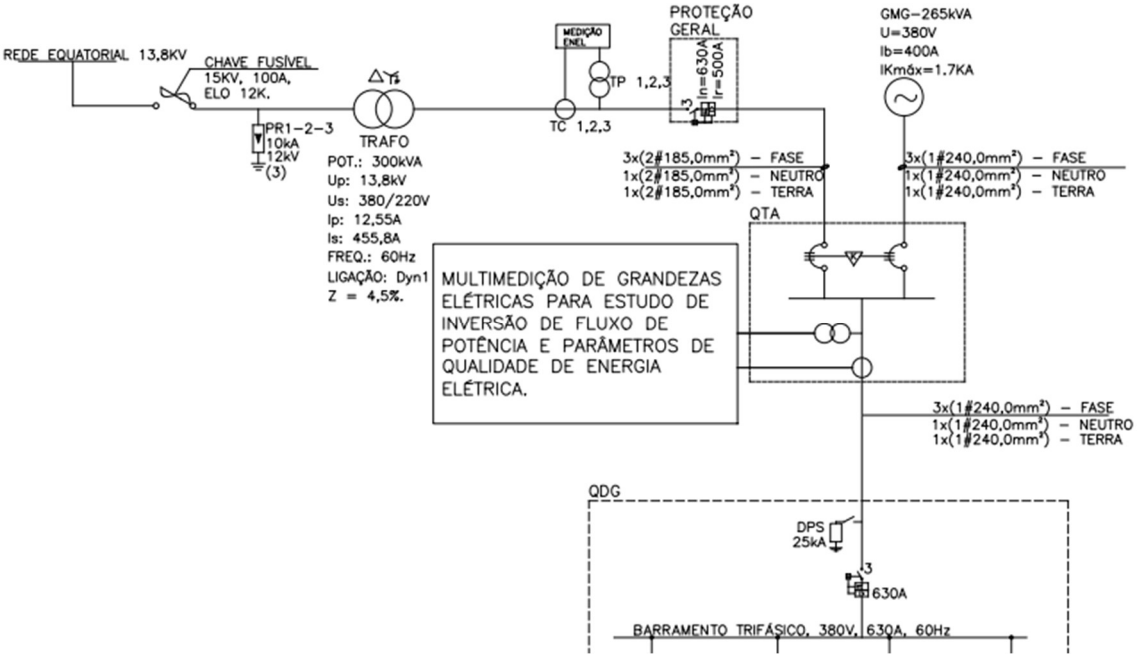
4.3 Identificar pontos de medição:

Para o estudo de caso, a escolha de realizar medições diretamente na barra do quadro de transferência automática se mostra estratégica, pois permite uma análise completa dos fluxos de potência e sua dinâmica no sistema. Com essa configuração, será possível monitorar tanto a injeção quanto o consumo de potência, permitindo uma observação precisa dos momentos de inversão de fluxo de potência. Isso é especialmente relevante para entender como a geração distribuída influencia a rede e em que medida esses fluxos variáveis impactam o sistema.

Além disso, essa localização facilita a análise de distorções harmônicas que podem ser introduzidas no transformador de potência devido a variações de carga e injeções de potência. A medição da corrente de neutro também será possível, permitindo uma visão detalhada dos desequilíbrios que possam ocorrer e dos possíveis impactos na estabilidade e na eficiência da instalação elétrica. Dessa forma, o estudo poderá gerar dados concretos para auxiliar na identificação de intervenções necessárias, garantindo a

qualidade e a confiabilidade da energia no sistema. Na figura 9 é indicado o local escolhido para instalação do ferramental de medição. O estudo foi realizado no Quadro de Transferência Automática (QTA), este painel é responsável por fazer a comutação entre rede da concessionária e grupo gerador no caso de uma falha da rede. Este painel concentra a corrente resultante (líquida) consumida pela Volga Engenharia.

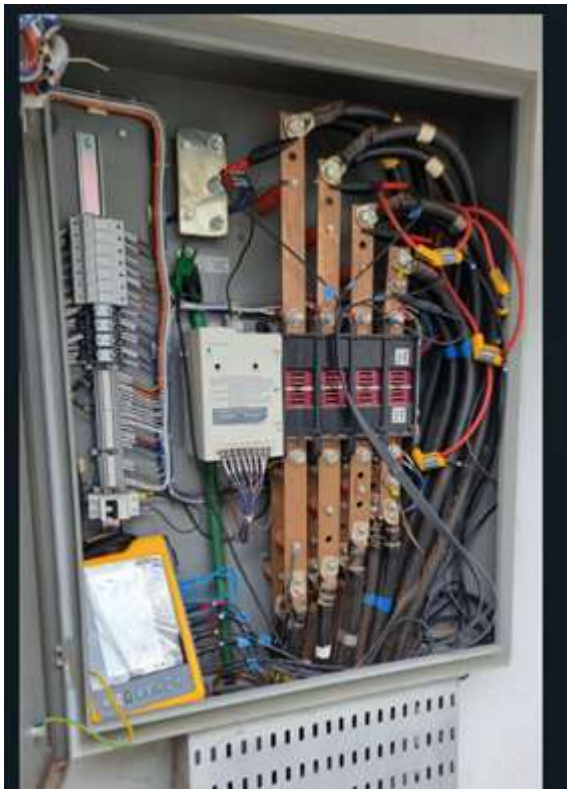
Figura 9 - Diagrama unifilar de entrada e QTA da Volga Engenharia.



Fonte: VOLGA ENGENHARIA, (2024)

Pode-se observar na Figura 10 a instalação do medidor nos barramentos superiores da chave de transferência automática, conforme o planejamento delineado no diagrama unifilar (Figura 9). Essa escolha de localização reflete a intenção de capturar informações precisas sobre a dinâmica de injeção e consumo de potência. Os barramentos inferiores são responsáveis pela interligação entre o grupo gerador e a rede da concessionária, permitindo uma transição fluida entre as duas fontes de alimentação. Essa configuração não apenas assegura a eficácia do monitoramento, mas também garante a conformidade com as especificações estabelecidas no projeto, facilitando a análise do fluxo de potência e a identificação de eventuais irregularidades no sistema elétrico.

Figura 10 - Imagem interna do QTA com medidor instalado.



Fonte: Próprio autor, 2024.

4.4 Selecionar instrumentos de medição:

Nesta etapa, que trata da seleção dos instrumentos de medição, é feita uma análise cuidadosa dos equipamentos necessários para avaliar adequadamente a qualidade de energia elétrica e detectar potenciais problemas no sistema em estudo. A escolha dos instrumentos de medição é fundamental para garantir a precisão dos dados e a representatividade dos resultados, considerando os parâmetros específicos que precisam ser monitorados para o diagnóstico da instalação elétrica.

Para este estudo, o analisador de energia Fluke 1775 (Figura 11) foi selecionado devido à sua capacidade de fornecer medições abrangentes e precisas de múltiplos parâmetros essenciais para uma análise completa da qualidade de energia elétrica. A escolha pelo Fluke 1775 se justifica pelas suas funcionalidades avançadas, que incluem medições de tensão, corrente, fator de potência, distorções harmônicas e eventos transitórios, possibilitando uma compreensão detalhada dos fenômenos elétricos no sistema, além de sua conformidade com as normas IEC 61000-4-30 (IEC, (2021)) Classe A, IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-15. Essas normas são fundamentais para garantir que

os dados capturados atendam aos padrões de qualidade e precisão exigidos para estudos de conformidade e comparação.

Figura 11 - Analisador de energia Fluke 1775

Fonte: Foto Próprio autor, 2024. FLUKE, (2024a)

A capacidade do Fluke 1775 de registrar harmônicas até a 50ª ordem e sua precisão nas medições de transientes de alta frequência tornam-no uma ferramenta imprescindível para identificar efeitos não lineares e oscilações de carga que podem influenciar o sistema, além de permitir o monitoramento da corrente no neutro, um parâmetro importante para este estudo de caso específico. Além disso, o analisador possui conectividade USB, Wi-Fi e Ethernet, o que facilita o acesso remoto e a transferência de dados em tempo real, permitindo que análises e ajustes sejam realizados de forma eficiente.

Ao optar pelo Fluke 1775, buscou-se assegurar que as medições realizadas sejam confiáveis e alinhadas aos requisitos das normas internacionais, oferecendo uma visão completa e precisa do comportamento da rede. Essa escolha também reflete a necessidade de um equipamento que permita uma configuração rápida e que minimize a ocorrência de erros humanos, já que o analisador conta com configuração automática e facilidade de instalação. Esse conjunto de recursos torna-o essencial para o estudo da inversão do fluxo de potência, análise de distorções harmônicas e monitoramento da corrente de neutro

sobre o transformador, parâmetros cruciais para a avaliação da qualidade da energia na instalação em questão.

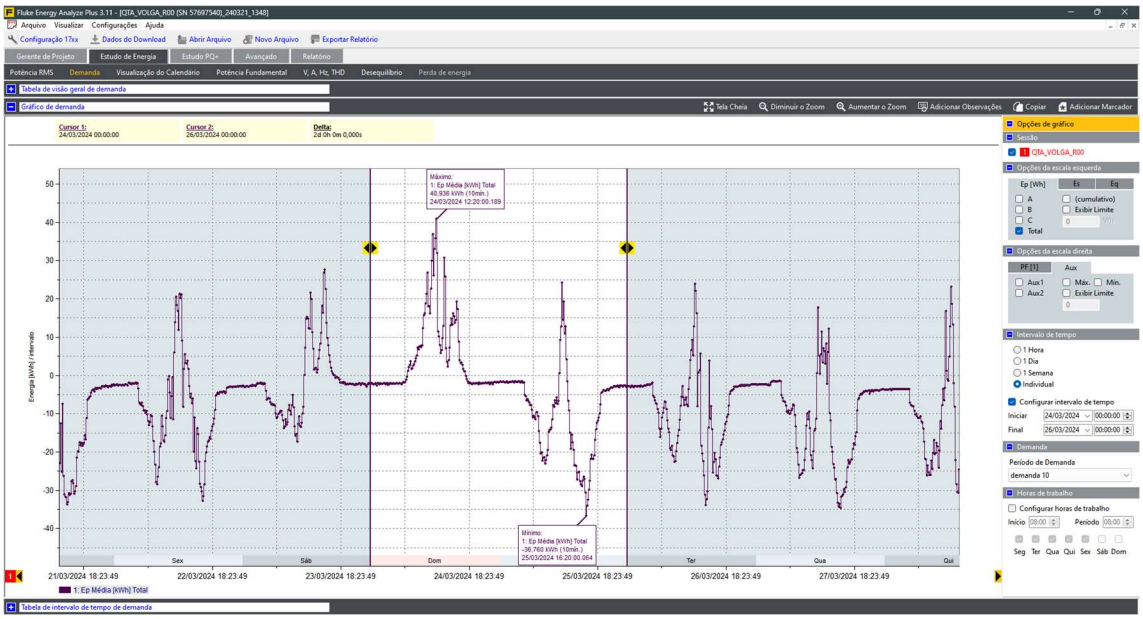
No estudo de caso, optou-se por não utilizar transformadores de potencial (TP's) para as medições de tensão, uma vez que o analisador de energia permite medições diretas em sistemas de até 1000V, o que simplifica a instalação e reduz as fontes potenciais de erro de medição associadas ao uso de TP's. Para as medições de corrente, foram utilizados sensores iFlex1500-24, que oferecem ampla faixa de medição e flexibilidade para instalação em painéis compactos. Esses sensores iFlex possuem alta precisão e uma capacidade de medição de até 1500A, adequados para capturar a variação de corrente de maneira detalhada e precisa.

Figura 12 - Sensor de corrente tipo Rogowski iFlex1500-24.

Fonte: Fonte Próprio autor, 2024. FLUKE, (2024b)

Para o estudo de caso, foi utilizado o *software* "*Fluke Energy Analyze Plus* 3.11" (Figura 13) para extrair e exportar os dados registrados pelo analisador de energia Fluke 1775. Esse *software* foi fundamental para a análise detalhada e visualização dos dados coletados, permitindo uma interpretação precisa de variáveis como tensão, corrente, harmônicos, e outros parâmetros de qualidade de energia. A ferramenta facilita a geração de gráficos temporais, espectros de harmônicos e relatórios personalizados, essenciais para documentar os resultados em conformidade com as exigências de normas internacionais, como a IEC 61000-4-30, e nacionais, como o módulo 8 do PRODIST.

Figura 13 - Interface *Fluke Energy Analyze Plus 3.11.*



Fonte: Próprio autor, 2024.

4.5 Configurar e calibrar os instrumentos:

Para garantir a precisão e conformidade das medições de qualidade de energia, o analisador de energia elétrica foi configurado de acordo com as especificações da IEC 61000-4-30, uma norma internacional que define os requisitos para medições precisas e consistentes em sistemas de potência, e com o Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), que estabelece os padrões mínimos de qualidade para o fornecimento de energia no Brasil.

Na configuração do aparelho, foram definidos os parâmetros de medição de forma a capturar com precisão os indicadores críticos para análise, como fator de potência, harmônicos, corrente e tensão de neutro. A norma IEC 61000-4-30 assegura que os dados de qualidade de energia atendam a critérios de exatidão e repetibilidade, imprescindíveis para análises comparativas e para a identificação de desvios. O PRODIST Módulo 8, por sua vez, fornece diretrizes específicas aplicáveis ao contexto brasileiro, como os limites de distorções harmônicas permitidas e as faixas aceitáveis de variação de tensão, garantindo que o estudo esteja alinhado aos requisitos regulatórios locais.

Como descrito pelo item 2.5.1.1 do Módulo 8 do PRODIST: “O conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deve compreender o registro de 1008 (mil e

oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, salvo as que eventualmente sejam expurgadas conforme item 9.1.10.2. No intuito de se obter 1008 (mil e oito) leituras válidas, intervalos adicionais devem ser agregados, sempre consecutivamente." (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022)

Para que as medições realizadas sejam consideradas válidas segundo estas normas, alguns critérios técnicos de conformidade precisam ser rigorosamente seguidos. Primeiramente, é exigido que a medição de tensão seja feita em intervalos de 10 minutos, permitindo que se obtenha uma média representativa das condições de operação do sistema e suas variações momentâneas. Esse intervalo é especialmente importante para capturar oscilações que possam ocorrer devido à carga e a flutuações na rede, promovendo uma amostragem que seja realmente representativa das condições gerais de funcionamento do sistema.

Para garantir alta precisão em medições de tensão e corrente, a norma IEC 61000-4-30 recomenda que a taxa de amostragem chegue a 512 amostras por ciclo em sistemas de 60 Hz. Esse nível de amostragem é essencial para detectar não apenas variações de tensão e corrente, mas também fenômenos como harmônicos e transitórios que se manifestam em intervalos extremamente curtos. Especificamente para a análise harmônica, a IEC 61000-4-30 determina que as medições incluam os componentes de sequência positiva, negativa e zero, além de harmônicos de ordens individuais que vão até o 50º harmônico, correspondente a 2.500 Hz. Já o PRODIST exige que sejam monitorados e limitados valores de DHT (Distorção Harmônica Total) e distorções harmônicas individuais, buscando assegurar que a rede de distribuição permaneça dentro de padrões aceitáveis de qualidade. Esse controle dos harmônicos é essencial para manter a integridade de equipamentos sensíveis conectados à rede.

Quanto aos limites de tensão adequados, segundo o Módulo 8 do PRODIST, uma condição de tensão apropriada deve se manter dentro de uma faixa que garanta o funcionamento eficiente e seguro dos equipamentos conectados. Quando a tensão se encontra fora dessa faixa, mas ainda dentro de limites toleráveis, ela é classificada como tensão precária, indicando um estado de operação que pode começar a comprometer a performance de dispositivos sensíveis. Por outro lado, quando a tensão ultrapassa limites considerados aceitáveis, ela é classificada como tensão crítica, representando um risco elevado para o funcionamento seguro do sistema elétrico, aumentando as chances de falhas e danos a equipamentos.

Abaixo, será apresentada na tabela 1 detalhes quanto aos limites de tensão para condições adequadas, precárias e críticas em um sistema com tensão nominal de 380 V.

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 2,3 kV (380V/220V).

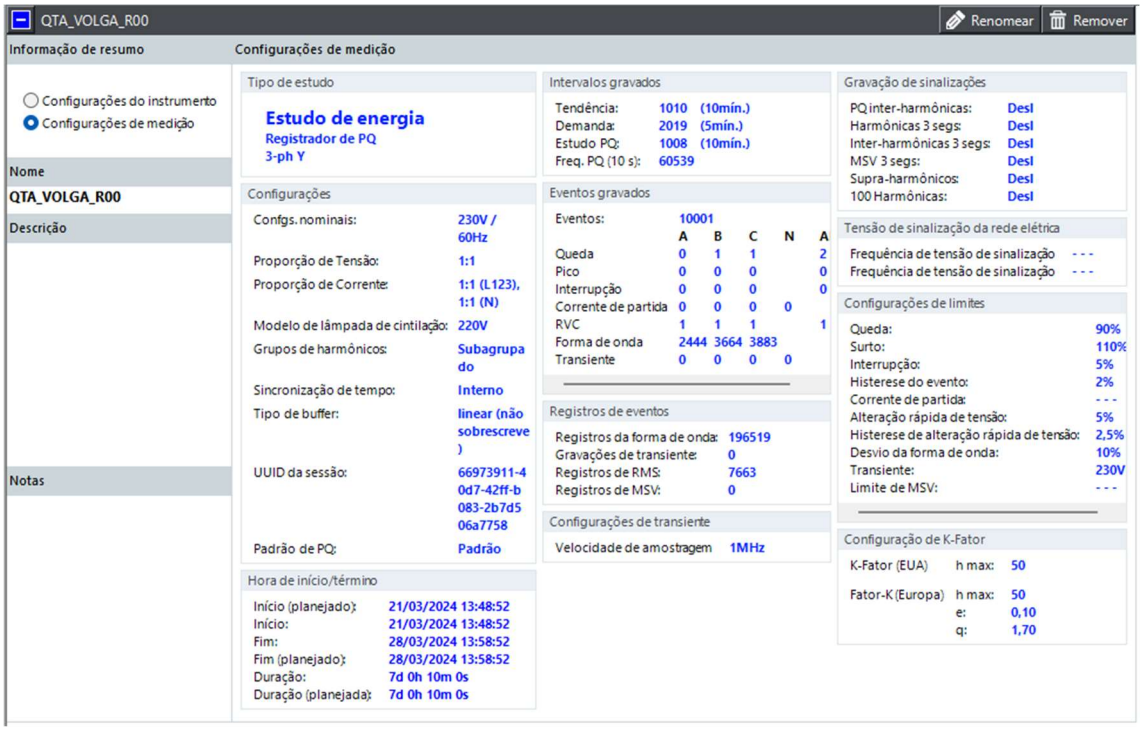
Tensão de Atendimento	**Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)**
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399)/(202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350$ ou $399 < TL \leq 403)/ (191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331$ ou $TL > 403)/(TL < 191$ ou $TL > 233)$

Outro aspecto importante para a conformidade segundo o PRODIST é o monitoramento de flutuações de tensão e eventos transitórios. Essas flutuações incluem afundamentos de tensão ("*sags*"), elevações ("*swells*") e interrupções momentâneas, todas com potencial para causar falhas em sistemas de alimentação e comprometer a operação de dispositivos conectados. A IEC 61000-4-30 estabelece que o equipamento de medição utilizado deve ser capaz de identificar e registrar esses eventos transitórios, mesmo que sua duração mínima seja de apenas um ciclo de frequência. Esse requisito é vital para diagnósticos precisos e para a prevenção de distúrbios na qualidade da energia.

As diretrizes estabelecidas pelo PRODIST e pela IEC 61000-4-30, quando cumpridas, asseguram que as medições de qualidade de energia sejam executadas com os níveis adequados de exatidão, repetibilidade e representatividade. Dessa forma, é possível não apenas diagnosticar possíveis problemas de qualidade, mas também garantir que as operações se mantenham dentro de padrões que preservem a integridade dos equipamentos e promovam a estabilidade geral do sistema elétrico.

A Figura 14, extraída do "*software* Fluke Energy Analyze Plus 3.11", ilustra a tela de relatórios do estudo conduzido na Volga Engenharia. Nesta tela, observa-se um total de 1010 amostras, coletadas em intervalos de 10 minutos cada, proporcionando um registro contínuo e detalhado. A medição teve início em 21 de março de 2024, às 13:48:52, e se estendeu até 28 de março de 2024, às 13:58:52, totalizando 7 dias e 10 minutos de monitoramento ininterrupto.

Figura 14 – Configuração de medição, resumo do *"Fluke Energy Analyze Plus 3.11"*.



Fonte: Próprio autor, 2024.

O equipamento utilizado é certificado para atender as especificações exigidas pelas normas vigentes "A série Fluke 1770 disponibiliza a melhor exatidão da sua classe que espera de um analisador de qualidade de potência Fluke, num pacote em conformidade com a norma IEC 61000-4-30, Classe A, edição 3. Além disso, a série 1770 foi projetada a fim de atender aos requisitos futuros da Classe A, edição 4, para conformidade com as normas EN 50160 (MASETTI, (2010)) e IEEE 519 (IEEE, (2022)) , deixando-o assim preparado para lidar já hoje com os requisitos de medição de amanhã." (FLUKE, 2024a). O equipamento foi configurado em conformidade com as exigências regulamentares, assegurando que o estudo cumpre integralmente os requisitos estabelecidos pelo PRODIST para uma medição válida.

4.6 Realizar a medição:

Nesta etapa será iniciada à análise dos dados obtidos durante as medições realizadas na Volga Engenharia, expondo informações sobre a qualidade da energia e fluxo de potência registrados no sistema elétrico da empresa. Serão apresentados os principais resultados obtidos, acompanhados de observações sobre eventuais problemas e desvios encontrados ao longo do período monitorado. Essas informações proporcionarão uma visão abrangente sobre o desempenho elétrico da instalação, guiando o aprofundamento das análises subsequentes e a interpretação dos fatores que impactam o funcionamento do sistema.

Para iniciar a análise, será observada a curva de potência consumida e injetada na rede da concessionária. Esse primeiro passo permite visualizar o comportamento do consumo e da geração ao longo do tempo, facilitando a identificação de padrões e eventuais picos que possam impactar a estabilidade do sistema. Para tanto, os dados do medidor serão exportados e analisados em uma plataforma de planilhas dinâmicas, possibilitando um estudo mais detalhado e flexível. Dessa forma, será possível identificar os períodos de inversão de fluxo e quantificar com precisão a energia em cada direção.

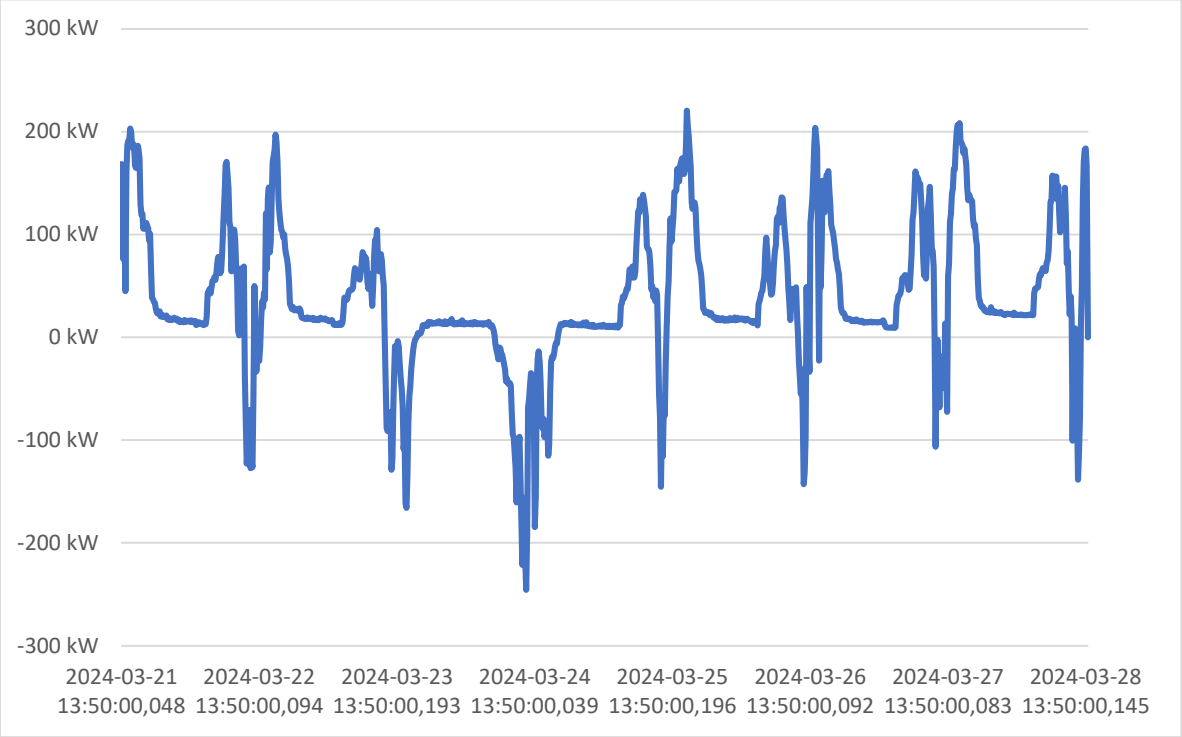
É possível observar pela figura 15 um registro temporal dos dias em que a medição foi realizada. Os dados revelam a potência líquida injetada no ponto de conexão com o transformador e, consequentemente, com a concessionária de energia elétrica. A curva apresenta tanto os momentos de exportação de potência excedente para a rede, associados aos períodos de pico da geração fotovoltaica, quanto os momentos de consumo líquido, quando a carga local supera a geração. A análise detalhada dessa curva permite compreender o comportamento dinâmico da interação entre a geração e o consumo.

Do ponto de vista de engenharia, essa análise fornece subsídios para avaliar a capacidade do transformador em lidar com a injeção de potência em níveis elevados, especialmente no que diz respeito ao impacto térmico e às distorções harmônicas no sistema. Também permite verificar o comportamento da tensão no ponto de conexão, garantindo que os limites estabelecidos pelo PRODIST sejam atendidos. Durante o período de medição, observou-se uma proximidade preocupante entre a potência injetada e a capacidade máxima nominal do transformador, o que pode levar ao superaquecimento e a condições operacionais fora das especificações de projeto.

Essa situação exige atenção especial, pois o funcionamento contínuo próximo ao limite de capacidade pode comprometer a vida útil do equipamento e afetar a qualidade

de energia fornecida, sobretudo no que tange à manutenção de níveis adequados de tensão e à mitigação de harmônicos. A avaliação contínua da potência líquida ao longo do período é indispensável para validar a viabilidade operacional do sistema e identificar a necessidade de ajustes, como a redistribuição de cargas, a implementação de filtros harmônicos ou mesmo a substituição do transformador por um modelo de maior capacidade, caso necessário.

Figura 15 - Potência nos barramentos do QTA



Fonte: Próprio autor, 2024.

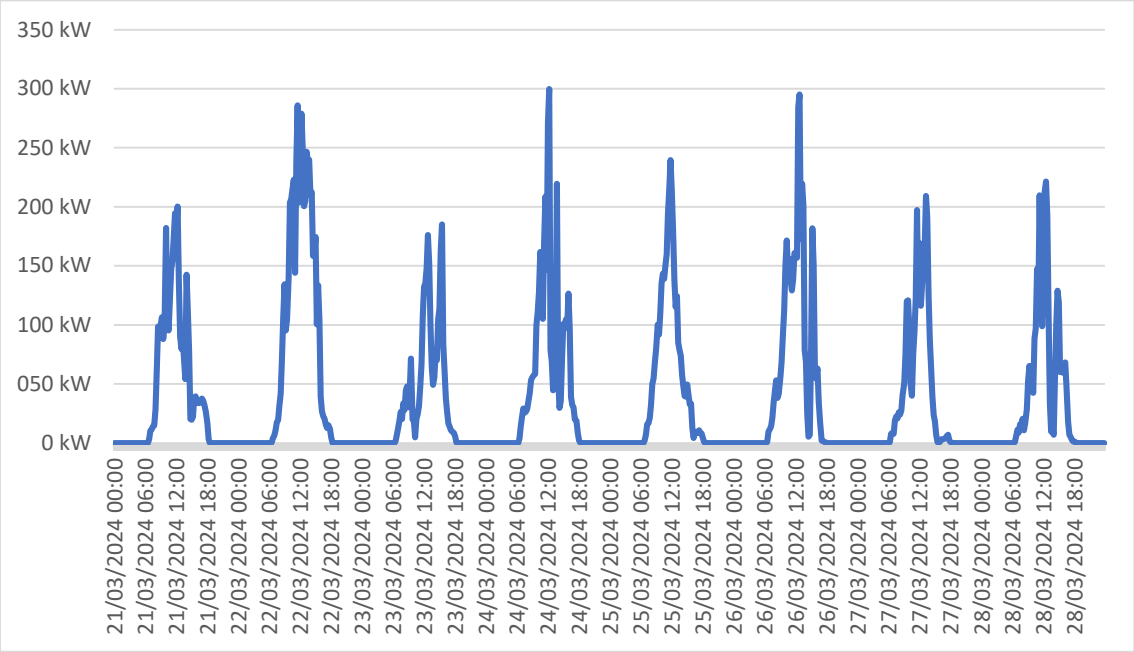
Observa-se um comportamento diário consistente nas curvas analisadas, com exceção dos dias 23 e 24 de março. Essa particularidade decorre do fato de esses dias corresponderem a um final de semana, quando a atividade fabril foi significativamente reduzida. Com a baixa demanda por parte da indústria, o comportamento do sistema foi predominantemente caracterizado pela injeção de energia proveniente da geração fotovoltaica.

É justamente nesse período de final de semana que se observa a injeção de potência se aproximando perigosamente da capacidade nominal do transformador. Essa situação levanta preocupações sobre a segurança operacional do equipamento, especialmente no que tange ao impacto térmico e à possibilidade de sobrecarga.

Essa análise destaca a influência das variações operacionais da planta industrial na dinâmica de potência do sistema. Durante os dias úteis, o consumo da atividade fabril modula a relação entre geração e injeção de potência, enquanto nos finais de semana, a menor demanda permite uma análise mais isolada da contribuição fotovoltaica e do comportamento do sistema em condições de baixa carga. Esses dados são cruciais para avaliar a capacidade de integração da geração renovável, bem como para planejar estratégias que garantam a operação segura e eficiente do transformador.

Além das medições realizadas nos barramentos do Quadro de Transferência Automática (QTA), também foi possível obter dados complementares de potência gerada diretamente na rede por meio das medições incorporadas nos próprios inversores da usina fotovoltaica. Esses registros cobrem o mesmo período em que as medições no QTA foram realizadas, permitindo uma análise comparativa e integrada entre a geração fotovoltaica e a injeção de potência no ponto de conexão com a concessionária. Abaixo, será disposto o gráfico (Figura 16) que ilustra a injeção de potência da usina fotovoltaica ao longo do período analisado.

Figura 16 - Potência fornecida pela usina fotovoltaica 300kWp.



Fonte: Próprio autor, 2024.

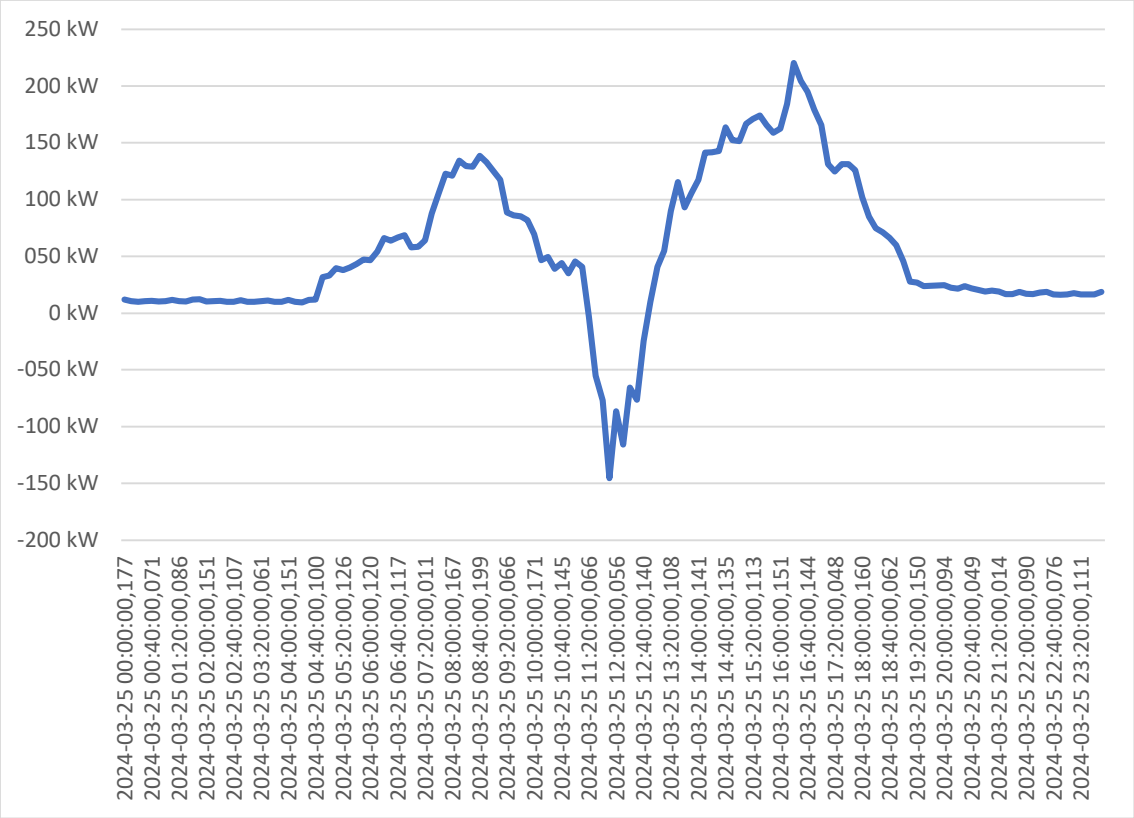
Essa abordagem possibilita uma visão mais detalhada do desempenho do sistema, permitindo identificar com precisão como a geração renovável contribui para a

energia injetada e avaliar possíveis discrepâncias entre os pontos de medição. Além disso, os dados gerados pelos inversores são fundamentais para verificar a eficiência da geração fotovoltaica e assegurar que o sistema esteja operando conforme esperado, atendendo aos critérios normativos e às demandas do consumidor.

A integração dessas medições também facilita a identificação de tendências, como períodos de máxima geração e sua correlação com a demanda reduzida, otimizando a operação da usina e reduzindo possíveis impactos no transformador e no sistema elétrico como um todo.

Para facilitar o entendimento e permitir uma análise mais clara, será adotado o dia 25 de março de 2024 como referência para detalhar as medições realizadas (Figura 17). Esse dia foi escolhido por apresentar características representativas da operação do sistema e por evidenciar os efeitos da inversão do fluxo de potência no ponto de conexão com a rede da concessionária.

Figura 17 – Potência lida na conexão geral no dia 25/03/2024



Fonte: Próprio autor, 2024.

Na Figura 17, é possível identificar com clareza o fenômeno conhecido como "curva do pato", evidenciado durante a inversão do fluxo de potência. Nas primeiras horas da manhã, observa-se uma elevação significativa no consumo de energia da concessionária, reflexo natural de um período em que a irradiação solar ainda não é suficiente para sustentar a geração fotovoltaica. Esse aumento no consumo é progressivamente amortizado à medida que a potência gerada pela usina fotovoltaica cresce com o avanço da manhã.

Por volta do meio-dia, quando se espera a máxima geração da usina fotovoltaica, ocorre uma queda acentuada no consumo de energia pela fábrica. Essa redução é amplificada pela pausa temporária das atividades industriais, já que boa parte do efetivo de colaboradores se encontra em intervalo para o almoço. Nesse intervalo, a geração solar atinge seu pico, levando ao ápice da inversão do fluxo de potência, registrado às 11:50hs, quando houve uma injeção líquida na rede da concessionária de 145,31 kW.

Entretanto, o retorno das atividades após o almoço traz um desafio significativo. A demanda por potência cresce de forma abrupta, desta vez sendo suprida pela concessionária de energia. Essa variação repentina de carga imposta à rede elétrica pode desencadear diversos impactos técnicos no sistema de potência.

Quando ocorre uma mudança súbita na solicitação de potência, os geradores conectados ao sistema precisam ajustar rapidamente sua saída para manter o equilíbrio entre geração e consumo, o que pode levar a variações na frequência do sistema. Essas variações, se significativas, podem ultrapassar os limites de segurança operacional (normalmente 0,5 Hz em redes interligadas), colocando em risco a estabilidade geral. Além disso, a rápida alteração na demanda pode provocar afundamentos ou elevações transitórias nos níveis de tensão, especialmente em sistemas com baixa inércia ou limitada capacidade de resposta dinâmica.

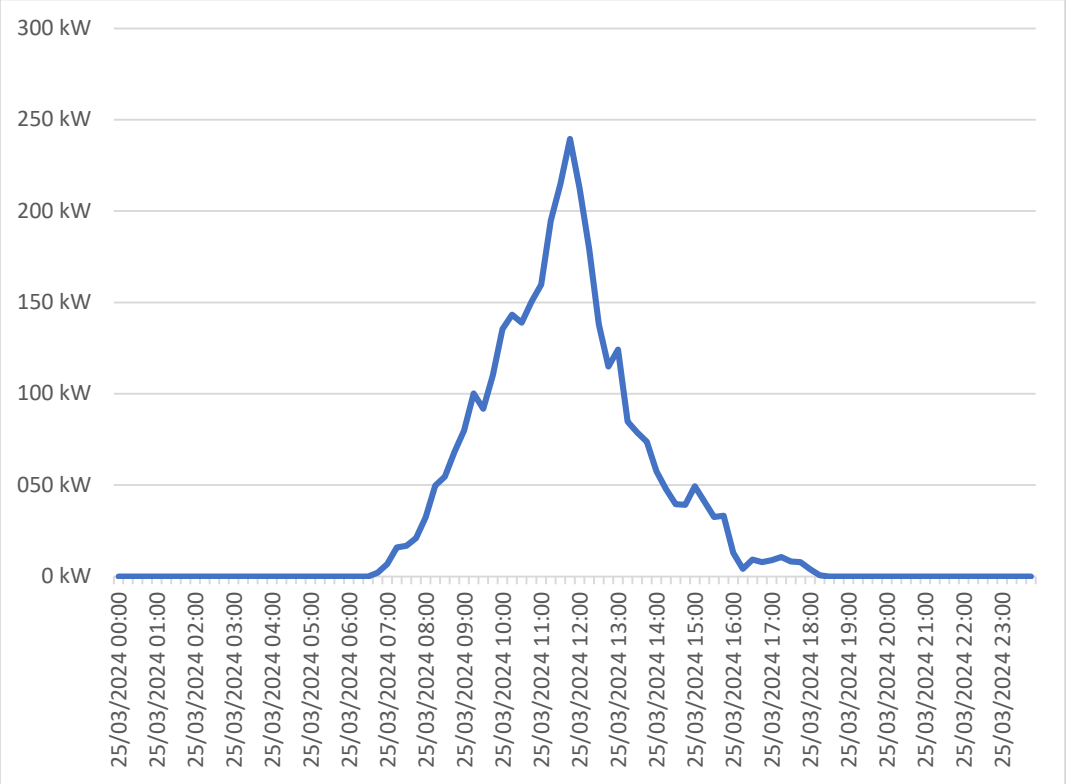
Adicionalmente, esses eventos podem resultar em flutuações de potência reativa, comprometendo a estabilidade de tensão nas barras do sistema. Para subestações e transformadores, há um aumento do estresse térmico devido ao crescimento momentâneo da corrente elétrica, o que pode reduzir a vida útil dos equipamentos ou até mesmo causar sobrecargas.

Em um cenário mais amplo, se eventos desse tipo forem replicados em várias unidades industriais ao longo da rede interligada nacional, os impactos podem ser severos. A exigência contínua de ajustes por parte dos geradores centrais e a amplificação das oscilações locais podem levar a instabilidades sistêmicas, inclusive desligamentos em

cascata, caso a rede não esteja preparada para suportar esses distúrbios. Isso reforça a importância de estratégias de controle avançadas, como armazenamento de energia ou ajustes dinâmicos de geração, para mitigar os efeitos dessas oscilações bruscas.

Na Figura 18 será analisada a geração solar fotovoltaica no dia 25 de março de 2024, data em que foram realizadas as medições nos barramentos gerais do QTA. Este gráfico oferece uma visão detalhada do comportamento da usina fotovoltaica ao longo desse período, permitindo observar os momentos em que ocorre a máxima geração de energia e, ao mesmo tempo, identificar os pontos em que a inversão do fluxo de potência se manifesta de forma significativa.

Figura 18 - Potência gerada pela usina fotovoltaica 300kWp no dia 25/03 /2024



Fonte: Próprio autor, 2024.

A máxima geração solar do dia foi registrada às 11:45hs, quando a usina fotovoltaica forneceu um total de 239,66 kW para o consumo da fábrica. Esse valor representa o pico da produção, atendendo totalmente à demanda da unidade industrial, com o excedente de energia sendo injetado na rede da concessionária de energia elétrica. Esse comportamento evidencia um momento de inversão do fluxo de potência, quando a

geração solar ultrapassa a necessidade da fábrica, resultando na injeção líquida de energia na rede elétrica.

Entretanto, devido às condições meteorológicas do dia, a geração fotovoltaica foi um pouco menor do que o projetado para o sistema de 300 kWp. O perfil da curva de geração, observado no gráfico, demonstra uma redução na produção de energia, com sombreamentos evidentes ao longo do período. Esses sombreamentos são causados por condições climáticas encobertas, que impactaram diretamente na intensidade da irradiação solar e, consequentemente, na eficiência da geração fotovoltaica.

Ao longo do dia, é possível perceber as flutuações típicas da geração solar, com picos de produção próximos ao meio-dia, quando a irradiação solar atinge seu valor máximo. Esses picos são contrastados com períodos de menor produção, como nas primeiras horas da manhã e no final da tarde, quando a energia gerada pela usina é insuficiente para suprir toda a demanda da unidade industrial, exigindo a complementação pela concessionária de energia.

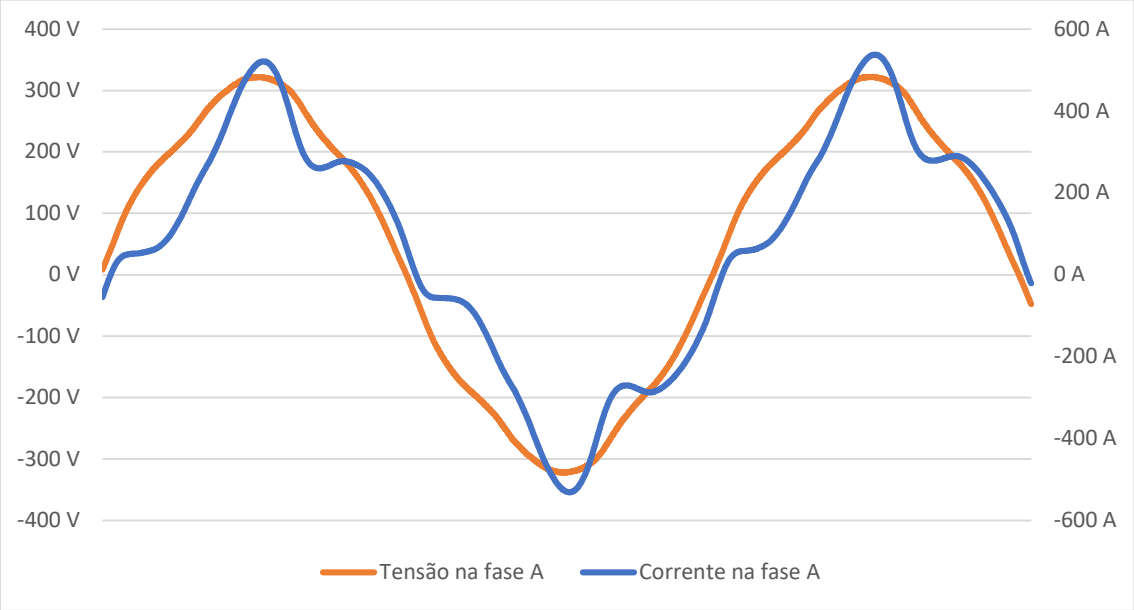
As Figuras 17 e 18 destacam o impacto significativo que o perfil de consumo da carga exerce sobre o funcionamento da rede elétrica. O momento de pico da geração fotovoltaica ocorre justamente quando a demanda da fábrica é reduzida de forma abrupta, criando uma condição em que a energia excedente gerada pela usina precisa ser direcionada à rede da concessionária. Essa inversão do fluxo de potência evidenciada como o equilíbrio entre geração e consumo está diretamente ligado às operações industriais e ao perfil de geração solar, reforçando a necessidade de análises detalhadas para entender as interações entre a geração distribuída e a rede elétrica.

Durante a realização do estudo, foi possível ampliar a análise para outros parâmetros de qualidade de energia elétrica além da injeção líquida de potência na rede. Entre eles, destaca-se o comportamento dos harmônicos ao longo do dia, especialmente em momentos críticos de inversão do fluxo de potência. A análise desses fenômenos permite avaliar como a interação entre a geração fotovoltaica e a rede elétrica afeta a distorção harmônica em tensão e corrente, e, consequentemente, a qualidade do fornecimento de energia.

A Figura 19, apresentada abaixo, é uma amostragem representativa de um momento da medição realizada, durante o qual houve solicitação de potência da concessionária de energia elétrica. Nesta figura, pode-se observar claramente uma forte presença de distorção harmônica na corrente elétrica, destacando o impacto das cargas não lineares conectadas ao sistema. Idealmente, em um sistema sem a presença de

harmônicos ou transitórios, tanto a forma de onda de corrente quanto a de tensão deveriam ser perfeitamente senoidais, refletindo uma operação equilibrada e estável. No entanto, a presença de harmônicos distorce a forma de onda da corrente, criando irregularidades que comprometem a qualidade da energia.

Figura 19 - Forma de onda sob influência de harmônicos.



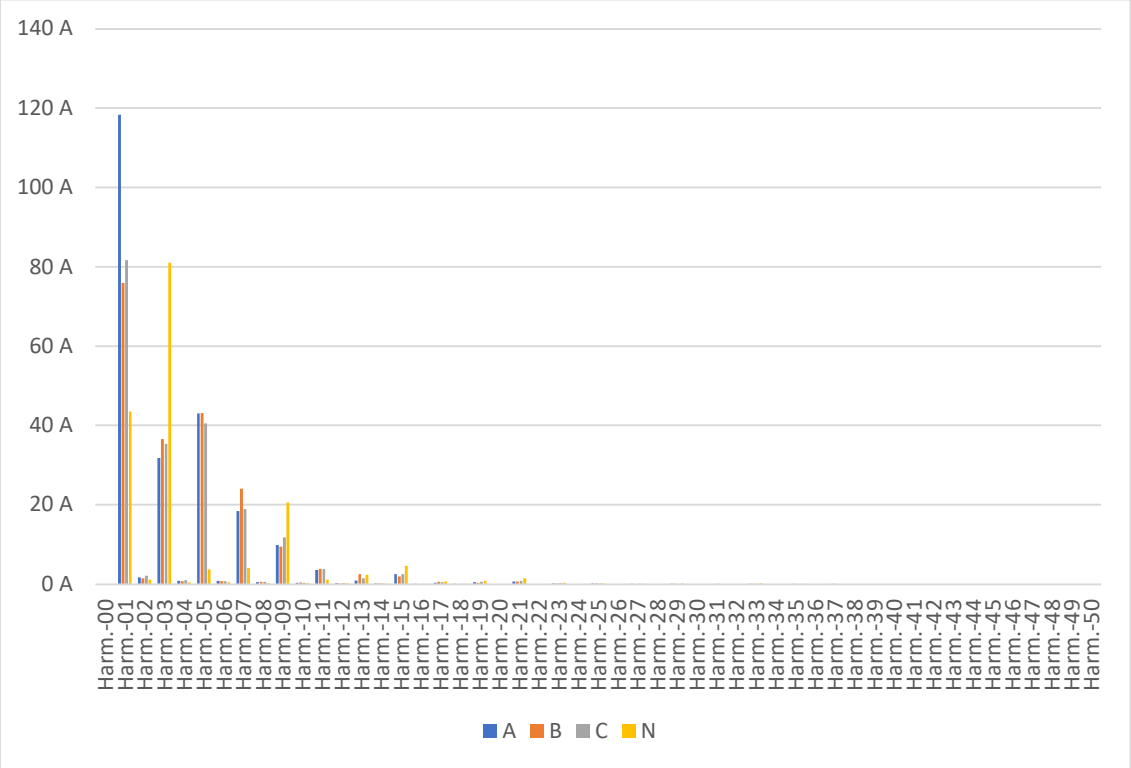
Fonte: Próprio autor, 2024.

Os harmônicos são influenciados tanto pela variação da geração solar quanto pelas mudanças abruptas na demanda de carga da fábrica, criando condições que podem exacerbar os níveis de distorção harmônica. Essas distorções podem impactar negativamente a eficiência do sistema, provocar aquecimento excessivo em equipamentos como transformadores e cabos, e comprometer o desempenho de dispositivos sensíveis conectados à rede.

O medidor utilizado neste estudo possui a capacidade de registrar até a 50ª harmônica do sistema elétrico, proporcionando uma análise detalhada da distorção harmônica presente. No entanto, para efeitos de ajuste de escala e clareza na visualização, será considerado graficamente apenas até a 15ª harmônica. Essa abordagem facilita o entendimento e a análise dos gráficos, destacando as harmônicas de maior relevância prática.

Conforme ilustrado na Figura 20, os efeitos das harmônicas superiores à 15ª ordem mostraram-se desprezíveis para a presente análise, tendo impacto mínimo sobre os parâmetros de qualidade de energia avaliados. Essa simplificação permite concentrar a atenção nas distorções mais significativas, que são geralmente associadas às ordens mais baixas, otimizando o estudo e reforçando a aplicabilidade dos resultados obtidos.

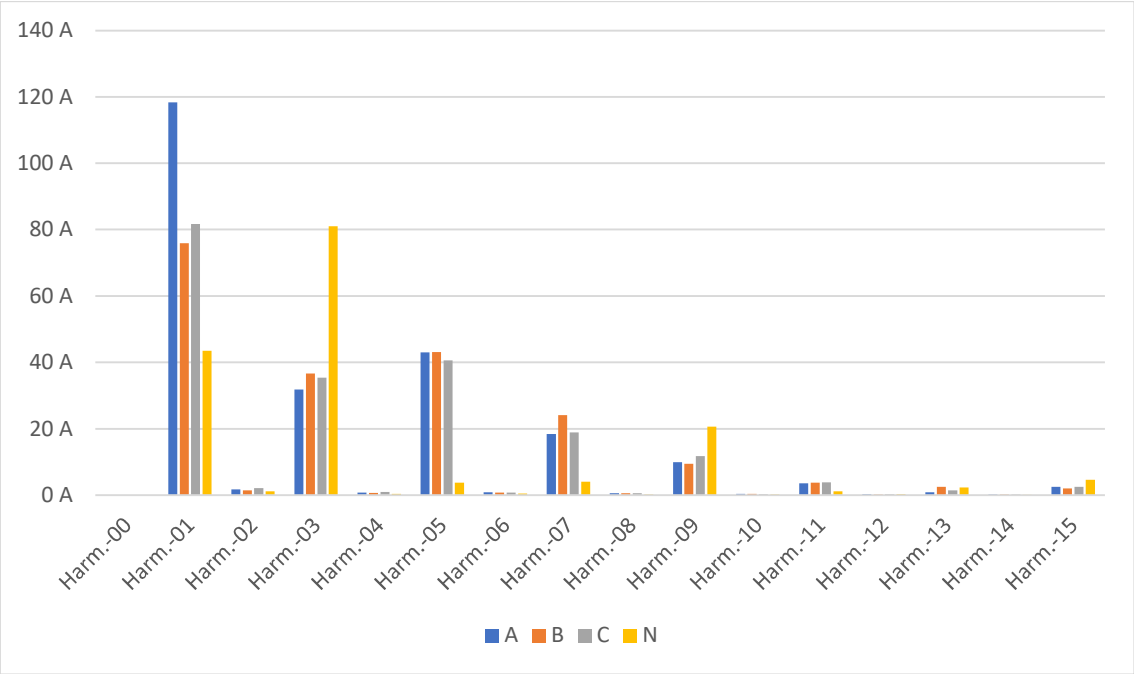
Figura 20 - Corrente elétrica nas fases das 50 harmônicas na Volga engenharia – 25/03/2024 às 11hs



Fonte: Próprio autor, 2024.

A análise inicial concentra-se nos momentos que antecedem a inversão do fluxo de potência, proporcionando uma base de comparação para avaliar as mudanças nos parâmetros de qualidade de energia. As medições apresentadas na Figura 21 representam os níveis de harmônicos presentes na rede às 11hs, 50 minutos antes do pico da inversão de potência. Nesse intervalo, a geração fotovoltaica já mostra um comportamento ascendente, mas ainda não atinge sua capacidade máxima, enquanto a carga fabril opera em pleno funcionamento.

Figura 21 - Corrente elétrica dos 15 primeiros harmônicos às 11:00hs do dia 25/03/2024.



Fonte: Próprio autor, 2024.

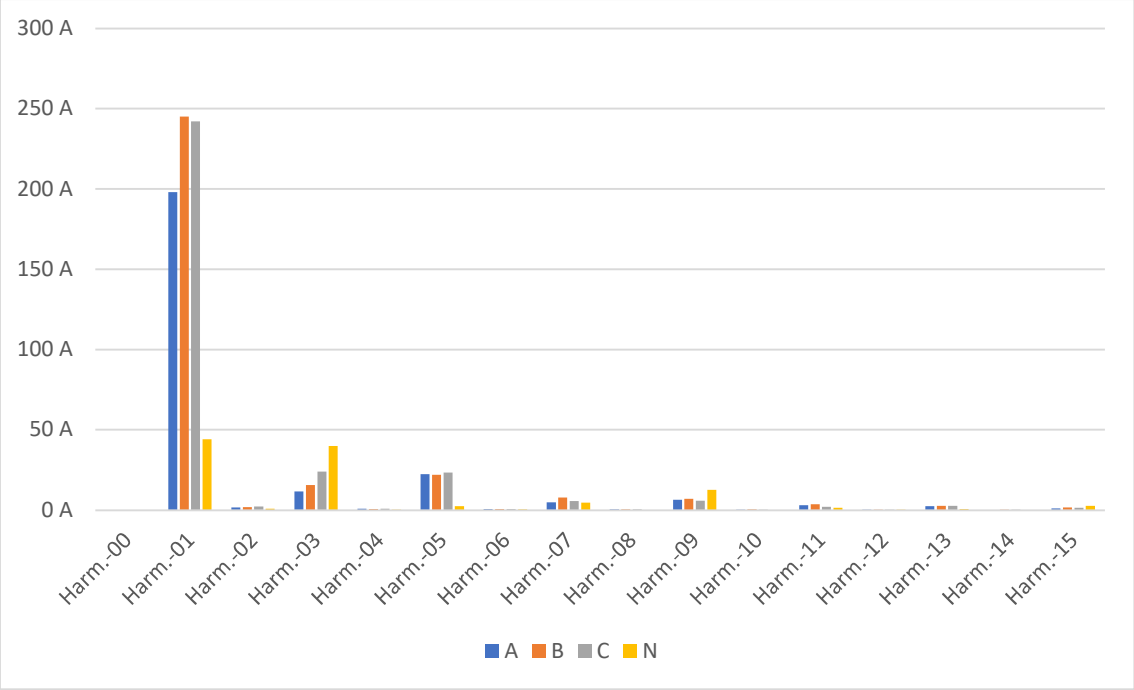
De imediato, é possível identificar uma corrente de neutro significativamente elevada, atribuída em grande parte aos harmônicos presentes no sistema. A terceira harmônica, em particular, destaca-se por apresentar um nível ligeiramente inferior ao dobro da corrente fundamental, comportamento típico em redes trifásicas com cargas não lineares. Harmônicos de sequência zero, como a terceira harmônica, têm a característica de se somar no condutor neutro, amplificando a corrente que circula por ele.

Essa condição pode gerar impactos importantes no sistema elétrico, como o aquecimento excessivo do condutor de neutro, aumento das perdas elétricas e redução da eficiência global do sistema. Além disso, correntes elevadas no neutro podem sobrecarregar transformadores e outros equipamentos, potencialmente reduzindo sua vida útil. A sequência zero refere-se aos componentes em que os vetores de fase são idênticos em amplitude e direção, sem defasagem. É associada a harmônicos de ordem múltipla de 3, como a 3ª, 9ª e 15ª ordens, que se somam no condutor neutro, gerando correntes elevadas.

Ao reduzir-se o consumo da fábrica durante o pico de inversão do fluxo de potência, registrado às 11:50hs, conforme mostrado na Figura 22, observa-se uma redução significativa nas correntes dos harmônicos e, como consequência direta, uma

diminuição acentuada da corrente no condutor neutro. Essa relação é esperada, já que a redução da carga industrial, composta em grande parte por equipamentos não lineares, diminui a geração de harmônicos, especialmente os de sequência zero, como os de 3ª ordem, que são os principais responsáveis pelo aumento da corrente no neutro.

Figura 22 - Corrente elétrica dos 15 primeiros harmônicos às 11:50 do dia 25/03/2024.



Fonte: Próprio autor, 2024.

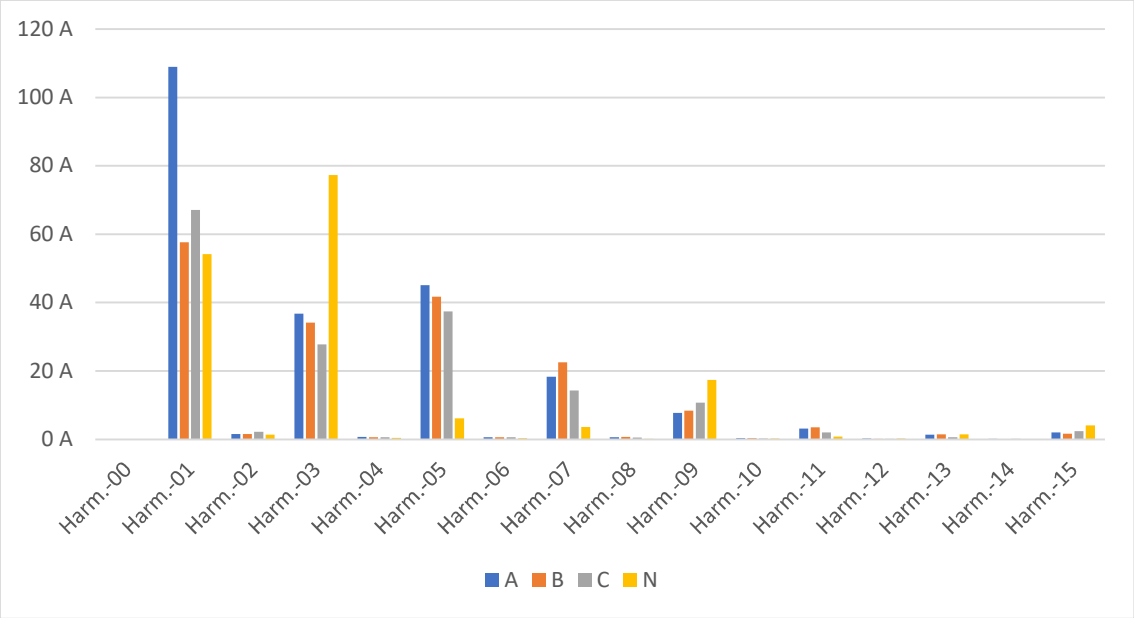
Embora a usina solar estivesse operando em plena capacidade, injetando 239,66 kW de potência no sistema por meio de inversores de frequência (dispositivos reconhecidos como cargas não lineares e potenciais geradores de harmônicos), foi observada uma significativa redução na poluição harmônica do sistema. Esse comportamento destaca que as cargas industriais da fábrica desempenham um papel predominante na geração de harmônicos, sobretudo devido ao uso de equipamentos com baixo amortecimento de transitórios e alta capacidade de poluir a rede, como um grande número de máquinas de solda e outras cargas não lineares.

A redução dos harmônicos durante o período de menor operação da fábrica indica que, enquanto os inversores de frequência da usina fotovoltaica contribuem para a presença de harmônicos, sua magnitude é significativamente menor em comparação às cargas industriais. Isso reforça a importância de avaliar os impactos específicos de cada

tipo de carga no sistema, identificando equipamentos que mais comprometem a qualidade da energia elétrica. Esse diagnóstico permite priorizar estratégias de mitigação, como a instalação de filtros harmônicos, redistribuição de cargas ou modernização de equipamentos, com foco em reduzir os impactos negativos no sistema elétrico e garantir maior estabilidade e eficiência da rede.

Ao realizar uma análise pós-inversão de fluxo de potência, figura 23, com a retomada das atividades fabris às 13hs, observa-se que a usina fotovoltaica continua contribuindo significativamente para o suprimento energético, entregando 124,22 kW ao sistema. No entanto, essa geração não é suficiente para atender à demanda total da fábrica, resultando na necessidade de 40,52 kW adicionais fornecidos pela concessionária.

Figura 23 - Corrente elétrica dos 15 primeiros harmônicos às 13hs do dia 25/03/2024



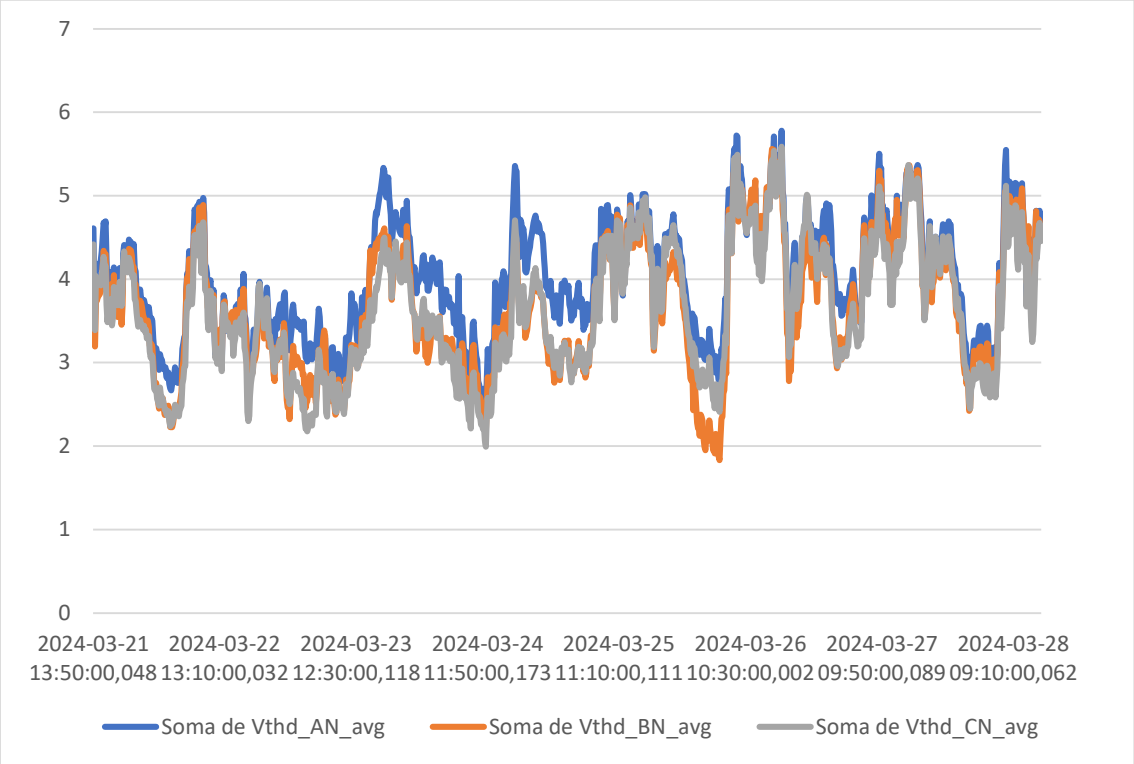
Fonte: Próprio autor, 2024.

Nesse cenário, verifica-se, novamente, uma presença marcante de harmônicos de 3ª e 5ª ordens, responsáveis por uma corrente de neutro elevada, indicando um aumento expressivo na poluição harmônica do sistema com o retorno das cargas industriais. Adicionalmente, chama atenção o desequilíbrio entre as fases, detectado na componente fundamental de 60 Hz. A análise revela uma sobrecarga significativa na fase “A”, que apresenta um nível de corrente consideravelmente maior em comparação às demais fases, indicando um desbalanceamento substancial no sistema trifásico.

Esse desequilíbrio de carga, combinado com a elevada presença de harmônicos, pode resultar em diversos problemas operacionais. A combinação de harmônicos de sequência zero (3ª ordem) e negativa (5ª ordem), juntamente com o desbalanceamento de carga, intensifica os esforços necessários para manter a estabilidade do sistema, aumentando o estresse sobre os transformadores e a infraestrutura elétrica.

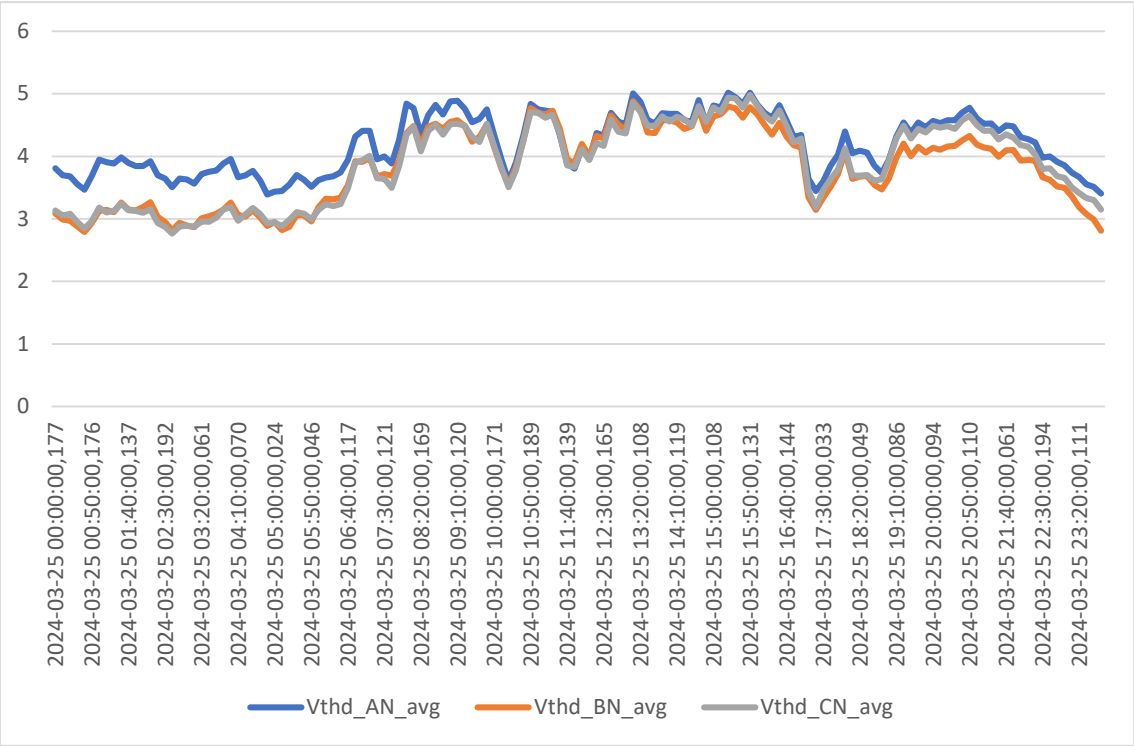
A Figura 24 apresenta o estudo de distorção harmônica total (DHT, ou THD em inglês) de tensão realizado no mesmo período em que foi analisada a inversão do fluxo de potência. Para uma análise detalhada, será dado enfoque ao comportamento das harmônicas registrado no dia 25/03/2024, conforme ilustrado na Figura 25, que evidencia um perfil característico dessas distorções.

Figura 24 - Medição de distorção harmônica total de tensão ao longo do período do estudo.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 25 - Medição de distorção harmônica total realizada no dia 25/03/2024.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Diferentemente das harmônicas de corrente, que são diretamente influenciadas pelas cargas conectadas ao sistema, as harmônicas de tensão são uma propriedade da qualidade de energia fornecida pela concessionária. Elas representam a distorção presente na forma de onda da tensão e são causadas principalmente pela interação entre as características do sistema elétrico, como a impedância da rede, e as distorções harmônicas geradas por cargas não lineares conectadas a essa rede. Assim, o comportamento das harmônicas de tensão reflete as condições do fornecimento de energia, sendo influenciado por outros consumidores e unidades industriais conectados à mesma rede elétrica na região.

As harmônicas de tensão tendem a ser menos variáveis em comparação com as harmônicas de corrente, pois dependem da rigidez do sistema e da contribuição agregada das cargas instaladas. Redes com alta impedância e baixa capacidade de curto-circuito são mais suscetíveis a apresentar maiores níveis de distorção harmônica de tensão, especialmente em regiões com alta concentração de cargas não lineares. Esse fenômeno é exacerbado quando equipamentos como inversores de frequência, retificadores e máquinas industriais são conectados em grande número, contribuindo para um aumento nas harmônicas de baixa ordem, como as de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

A análise específica do dia 25/03/2024 permite avaliar como a qualidade do fornecimento da concessionária interage com o sistema local, evidenciando a influência de fatores externos no comportamento das harmônicas de tensão. Essas distorções, embora menos influenciadas pela operação local, podem impactar diretamente o desempenho de equipamentos sensíveis e a operação de dispositivos conectados à rede, como transformadores e geradores, destacando a importância de seu monitoramento e controle.

O comportamento da curva de DHT (Distorção Harmônica Total) ao longo do dia evidencia a influência das unidades consumidoras vizinhas sobre os harmônicos de tensão no sistema. Durante as primeiras horas da madrugada, antes das 6:00 da manhã, o DHT permanece em níveis mais baixos, refletindo o menor consumo de energia característico desse período, quando a atividade industrial está reduzida ou ausente. Esse padrão está associado aos horários comuns de início e fim de expediente fabril, com menor contribuição de cargas não lineares conectadas à rede.

A partir das 6:00hs da manhã, com o aumento gradual da atividade industrial, observa-se uma intensificação das distorções harmônicas de tensão, representadas pelo aumento do DHT. Esse comportamento está diretamente ligado ao acionamento de máquinas e equipamentos industriais, muitos dos quais são fontes de harmônicos de baixa ordem. Esses dispositivos, ao interagir com a impedância da rede, amplificam as distorções harmônicas, que se propagam para outros consumidores conectados ao mesmo sistema.

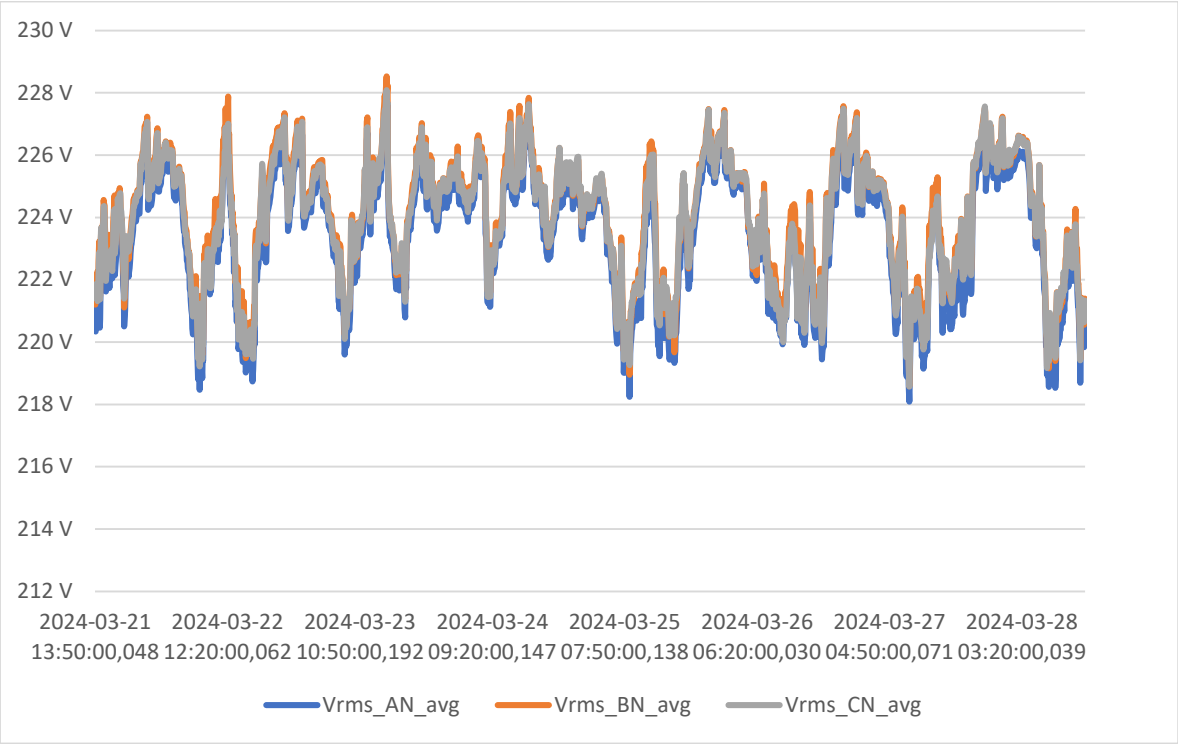
Por outro lado, após as 18hs, há uma redução gradual nas atividades industriais, resultando em uma diminuição no DHT para níveis mais baixos. Esse comportamento ocorre devido à desativação de cargas industriais no encerramento do expediente fabril, o que alivia as condições da rede e reduz a intensidade das distorções harmônicas de tensão. Esse ciclo diário do DHT reflete claramente a relação entre os perfis de carga regionais e a qualidade da energia fornecida.

Segundo o Módulo 8 do PRODIST, o limite máximo permitido para a Distorção Harmônica Total de Tensão em redes inferiores a 2,3 kV, que correspondem a sistemas de baixa tensão, é de 10%. Isso significa que a raiz quadrada da soma quadrática de todas as harmônicas presentes na forma de onda da tensão não deve exceder 10% do valor da tensão fundamental. A imposição desse limite visa assegurar a qualidade da energia elétrica fornecida, evitando que níveis excessivos de distorção harmônica comprometam o funcionamento adequado dos equipamentos conectados à rede. Para o período

analisado, no que diz respeito ao DHT de tensão, a tensão disponibilizada pela concessionária se encontra dentro dos limites normativos.

Pela Figura 26, é possível identificar que a tensão na rede se mantém em conformidade com os limites entre 202V e 231V estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, sendo considerada adequada para sistemas de baixa tensão em 380V/220V.

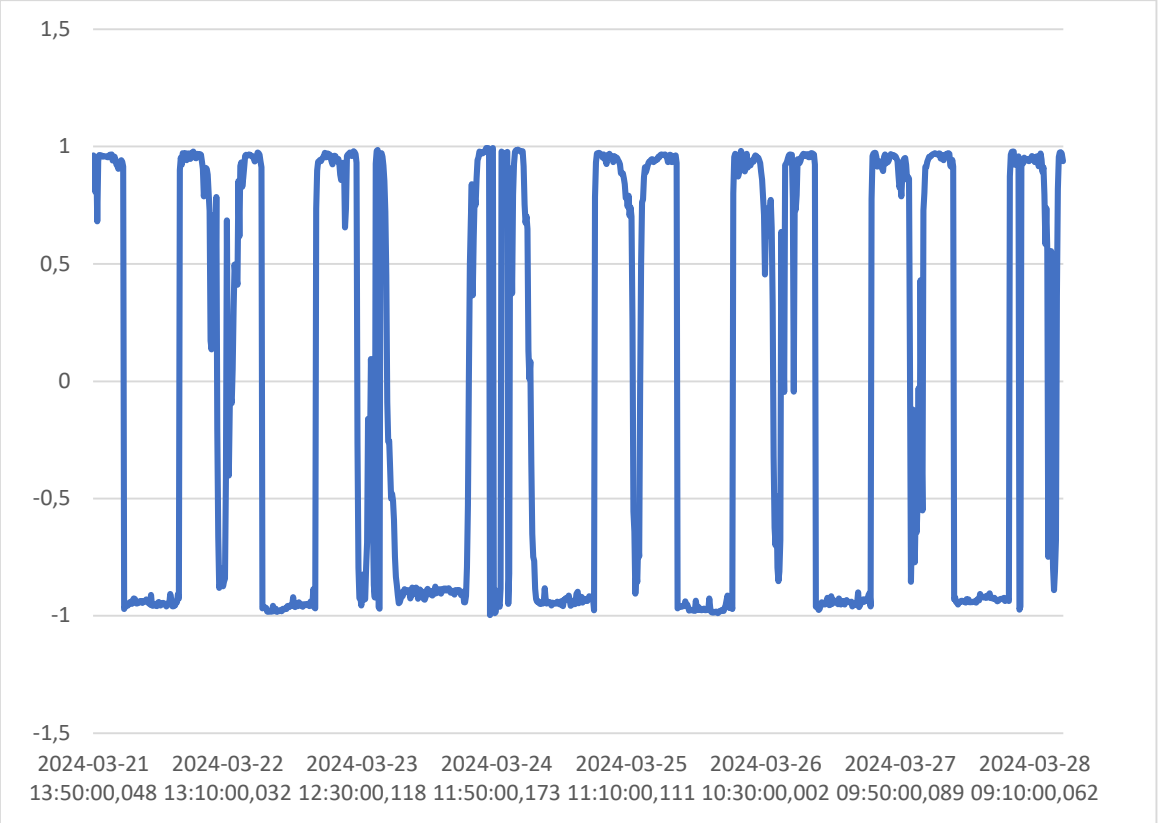
Figura 26 - Tensão média medida durante os 7 dias do estudo.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Na Figura 27, é possível observar o comportamento padrão do fator de potência ao longo da semana de medição. O gráfico revela tendências consistentes, como a ocorrência de fatores de potência negativos em determinados períodos, especialmente durante a madrugada, mesmo quando o sistema está consumindo potência ativa da concessionária. Esse fenômeno está relacionado à direção da potência reativa no sistema, que pode inverter o sinal do fator de potência sem que a potência ativa seja exportada.

Figura 27 - Fator de potência verdadeiro .

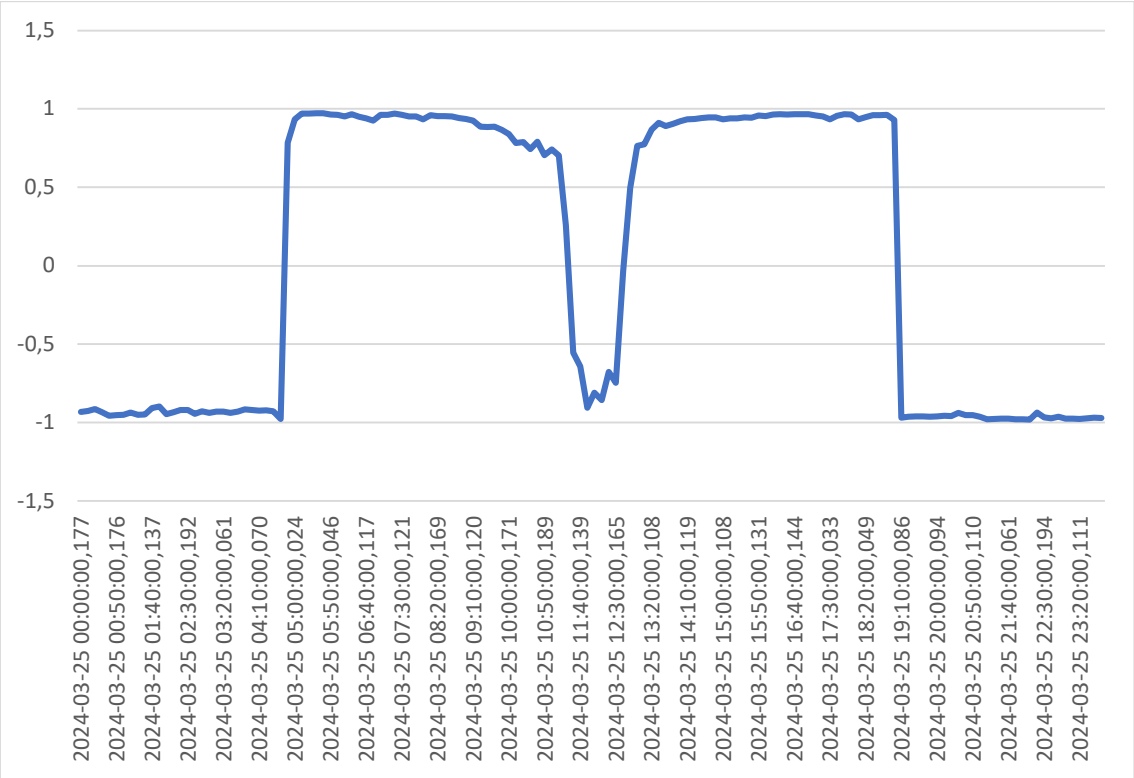


Fonte: Próprio autor, 2024.

O fator de potência negativo ocorre quando a potência reativa é predominantemente fornecida pelo sistema local para a rede. Isso pode ser resultado da operação de inversores de frequência, bancos de capacitores ou outros equipamentos que geram potência reativa em excesso. Outro fator relevante é o comportamento de cargas não lineares ou desequilibradas, que podem impactar a medição e a interpretação do fator de potência. Essa condição reforça a necessidade de uma análise detalhada das contribuições de potência ativa e reativa, bem como das configurações de dispositivos de compensação no sistema.

Na Figura 28, o foco está no comportamento do fator de potência durante o dia 25/03/2024, permitindo uma análise mais detalhada de sua dinâmica em um período representativo. Durante esse dia, observa-se o impacto das operações industriais e da interação com a geração distribuída no perfil de potência reativa. Nos períodos da madrugada, o fator de potência negativo destaca a predominância de exportação de reativos, enquanto, ao longo do dia, a variação reflete a combinação de geração fotovoltaica, consumo industrial e possíveis desequilíbrios entre as fases.

Figura 28 - Fator de potência verdadeiro – 25/03/2024.

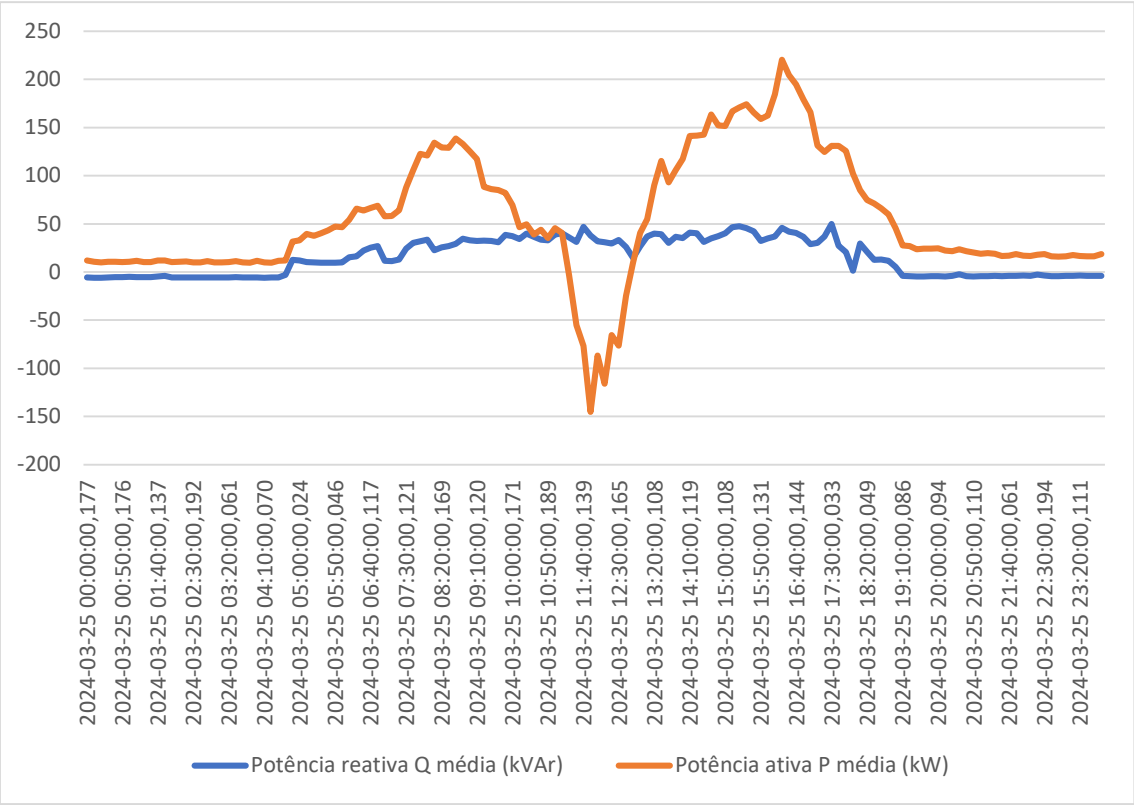


Fonte: Próprio autor, 2024.

Essas análises são fundamentais para compreender o comportamento do fator de potência em sistemas com geração distribuída e identificar oportunidades de otimização, como ajustes em inversores, balanceamento de cargas ou reavaliação de compensadores reativos. Garantir um fator de potência estável e alinhado às normas é essencial para manter a eficiência e a estabilidade da operação do sistema elétrico.

Contrapondo os gráficos apresentados nas Figuras 28 e 29, torna-se evidente a relação entre as potências ativa e reativa (Figura 29) e o comportamento do fator de potência (Figura 28). A análise conjunta permite identificar as causas do aparecimento do fator de potência negativo em diferentes momentos, tanto na madrugada quanto no período de inversão do fluxo de potência.

Figura 29 - Balanço de potências ativa e reativa 25/04/2024



Fonte: Próprio autor, 2024.

Na Figura 29, observa-se que, durante a madrugada, há consumo de potência ativa da rede, enquanto a potência reativa é predominantemente gerada e exportada para a concessionária. Essa exportação de potência reativa, geralmente resultante do excesso de compensação gerada por inversores, bancos de capacitores ou outros dispositivos, é a principal causa do fator de potência negativo nesse período. Apesar de o sistema consumir potência ativa, a predominância da exportação de potência reativa inverte o ângulo entre corrente e tensão, gerando o sinal negativo do fator de potência.

Além disso, na Figura 28, verifica-se que o fator de potência negativo também surge durante o momento de inversão do fluxo de potência, quando a energia ativa gerada pela usina fotovoltaica excede a demanda local e é injetada na rede da concessionária. Nesse caso, o que se inverte é a potência ativa, enquanto a potência reativa mantém seu comportamento, sendo consumida ou fornecida conforme a demanda das cargas e o ajuste dos dispositivos de compensação. Essa dinâmica evidencia que, enquanto na madrugada o fator de potência negativo é causado pela predominância de potência reativa exportada, no período de inversão do fluxo de potência ele é resultado da mudança no sentido da

potência ativa gerada pela usina fotovoltaica. A análise detalhada desses momentos destaca a importância de considerar tanto a potência ativa quanto a reativa para compreender completamente o comportamento do fator de potência. Esses resultados reforçam a necessidade de ajustes nos sistemas de geração e compensação reativa, como configurações adequadas de inversores e capacitores, além de um monitoramento contínuo para otimizar a operação e garantir a conformidade com as normas de qualidade de energia.

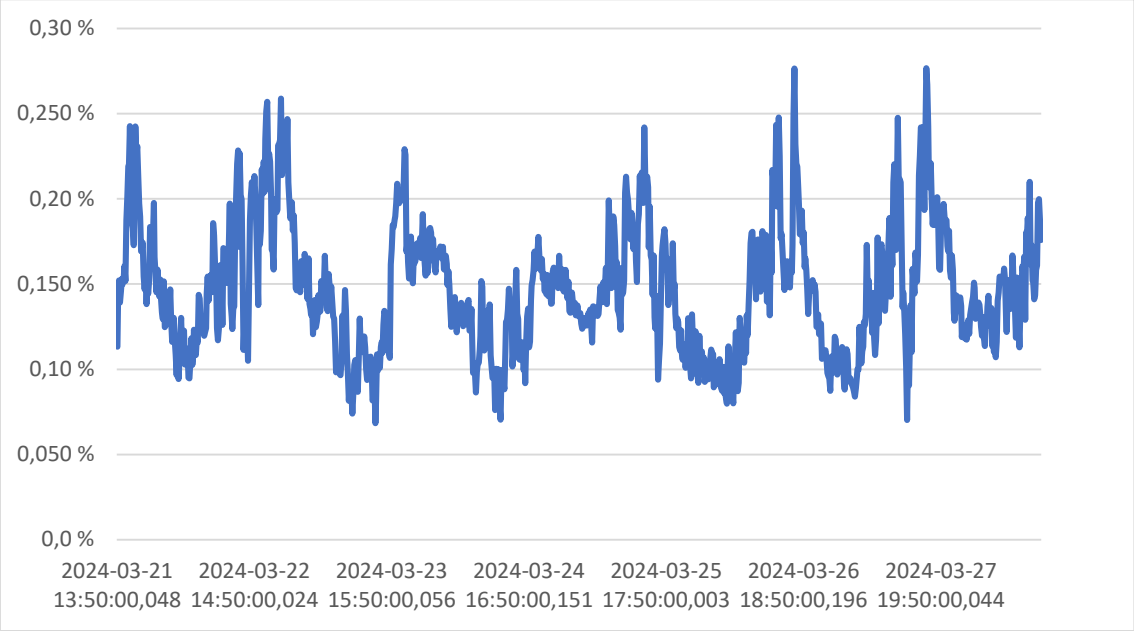
A análise do comportamento do fator de potência, apresentada nas Figuras 28 e 29, também tem implicações diretas na cobrança de encargos como o Energia Reativa Excedente (ERE) e o Demanda Reativa (DRE), regulamentados pela resolução 1000 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, (2021)). Esses encargos são aplicados quando a relação entre potência ativa e reativa do sistema não é mantida dentro de limites aceitáveis, resultando em penalidades financeiras para o consumidor. Durante a madrugada, observa-se na Figura 29 que, embora o sistema consuma potência ativa da concessionária, há exportação de potência reativa para a rede, causada pelo excesso de compensação reativa por inversores ou capacitores. Esse comportamento resulta em um fator de potência negativo, que pode impactar diretamente a cobrança de ERE. O ERE é aplicado quando o consumo de reativos excede os limites estipulados, mesmo que em períodos de baixa demanda, penalizando consumidores que comprometem o equilíbrio do sistema elétrico.

Já no período de inversão do fluxo de potência, verifica-se que o fator de potência negativo decorre da exportação de potência ativa gerada pela usina fotovoltaica, enquanto a potência reativa mantém seu padrão. Nesse caso, a análise do DRE torna-se relevante, pois esse encargo está associado ao consumo máximo de potência reativa em horários específicos. A injeção de potência ativa combinada com o consumo de reativos pode agravar o impacto financeiro do DRE, especialmente se a operação da instalação não estiver alinhada com práticas otimizadas de compensação de reativos. Esses resultados ressaltam a importância de um gerenciamento eficiente das potências ativa e reativa para evitar cobranças adicionais de ERE e DRE. Medidas como o ajuste dos inversores fotovoltaicos para minimizar a exportação de reativos, a reconfiguração de bancos de capacitores para evitar sobrecompensação e o monitoramento contínuo do perfil de consumo podem ajudar a manter os índices de qualidade da energia dentro dos padrões e reduzir os encargos financeiros associados. A compreensão dessas relações

permite uma operação mais eficiente e economicamente vantajosa do sistema elétrico da instalação.

Um dos pontos críticos a serem analisados em sistemas elétricos é o desequilíbrio de tensão e corrente, que pode impactar significativamente o desempenho e a segurança dos equipamentos conectados à rede. Na Figura 30, é apresentado o percentual de desequilíbrio de tensão registrado no ponto de entrega da concessionária durante o período do estudo. Esse parâmetro reflete as diferenças entre as magnitudes das tensões das fases, bem como os desvios nos ângulos de fase, que podem ocorrer devido a assimetrias na rede ou na distribuição de cargas.

Figura 30 - Percentual de desequilíbrio de tensão ao longo do estudo.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Desequilíbrios de tensão trazem diversos riscos ao sistema elétrico. Um dos mais críticos é o sobreaquecimento de motores trifásicos, pois mesmo pequenos desvios podem gerar correntes de sequência negativa significativas, criando forças contrárias à rotação do motor. Isso resulta em aumento do aquecimento, redução da eficiência e falhas prematuras. Além disso, o desequilíbrio aumenta as perdas elétricas e térmicas em transformadores, motores e cabos, acelerando o desgaste desses componentes, reduzindo sua vida útil e aumentando os custos de manutenção. Outro impacto relevante é o comprometimento da qualidade da energia, uma vez que o desequilíbrio pode amplificar distorções harmônicas no sistema, especialmente as de sequência negativa e zero. Isso

agrava problemas como correntes elevadas no neutro e oscilações de tensão. Dispositivos eletrônicos sensíveis, como inversores, retificadores e sistemas de automação, também são afetados, podendo apresentar mau funcionamento, desligamentos ou falhas. Além disso, desequilíbrios de tensão podem levar à sobrecarga de transformadores e condutores, aumentando perdas por efeito Joule e comprometendo a integridade desses equipamentos.

Segundo Módulo 8 do PRODIST, o desequilíbrio de tensão deve ser mantido dentro de limites toleráveis. Para baixa tensão (abaixo de 1 kV), o desequilíbrio máximo recomendado é de 3%, enquanto para tensões mais elevadas (entre 1 kV e 230 kV), o limite é de 2% (Tabela 2). Valores acima desses limites indicam necessidade de intervenções para evitar danos ao sistema.

Tabela 2 - Limites de desequilíbrio de tensão segundo o PRODIST.

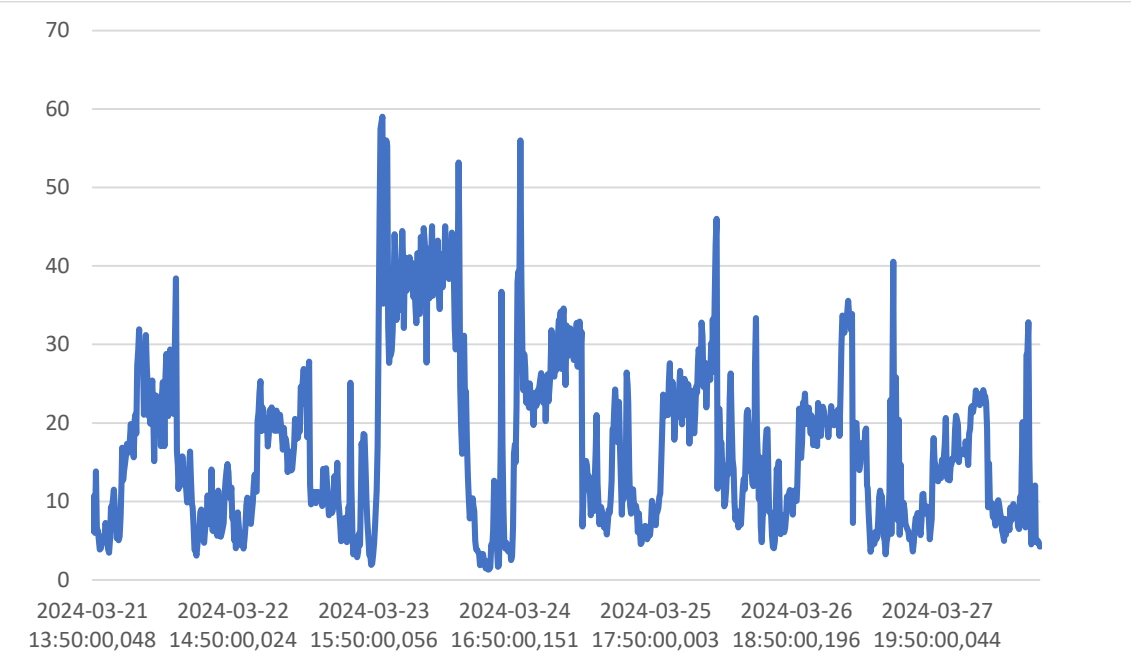
Indicador	Tensão nominal	
	Vn ≤ 1,0 kV	1 kV < Vn < 230kV
FD95%	3,00%	2,00%

A mitigação do desequilíbrio de tensão pode ser alcançada por meio do rebalanceamento de cargas, redistribuindo cargas monofásicas para equilibrar a demanda entre as fases. O uso de equipamentos de compensação, como reguladores automáticos de tensão e filtros de sequência negativa, também são uma solução eficaz. Monitoramento contínuo e manutenção da infraestrutura, como verificações de conexões, cabos e transformadores, são igualmente essenciais. A análise do percentual de desequilíbrio de tensão apresentada na Figura 30 permitiram identificar que os valores registrados estão dentro dos limites normativos.

Comparando agora o desequilíbrio das correntes com o das tensões, observa-se uma diferença expressiva entre os resultados. Enquanto o desequilíbrio de tensão é relativamente pequeno e dentro de limites normativos, o desequilíbrio das correntes é significativamente mais elevado, conforme evidenciado na Figura 31. Essa disparidade reflete a influência predominante das cargas conectadas à rede sobre o comportamento das correntes. Desequilíbrios de corrente são comuns em sistemas com cargas monofásicas distribuídas de maneira assimétrica entre as fases, o que resulta em uma corrente desbalanceada. Além disso, equipamentos com características não lineares,

como inversores, retificadores e motores, também contribuem para a geração de correntes de sequência negativa e zero, amplificando o desequilíbrio nas fases. A Figura 31 evidencia a necessidade de medidas específicas para reduzir o desequilíbrio de corrente, como o rebalanceamento de cargas e a análise detalhada das características das cargas conectadas ao sistema. Essa abordagem, associada ao monitoramento contínuo.

Figura 31 - Percentual de desequilíbrio de corrente ao longo do estudo.

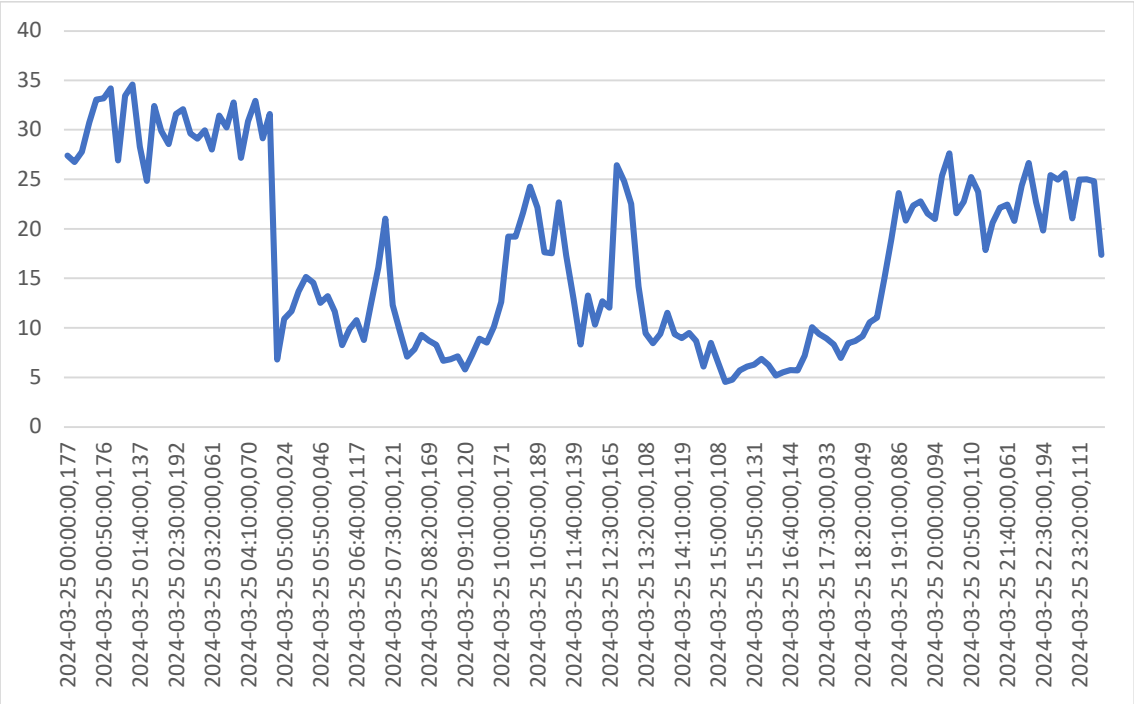


Fonte: Próprio autor, 2024.

A Figura 32 apresenta uma análise mais detalhada do desequilíbrio de correntes ocorrido no dia 25/03/2024, destacando-se como uma expansão dos dados previamente analisados. Este retrato evidencia de forma clara o desequilíbrio significativo entre as fases do sistema, reforçando a assimetria nas cargas conectadas. No entanto, um comportamento interessante é observado durante o momento de inversão do fluxo de potência, que coincide com a redução das atividades industriais para o intervalo de almoço: há uma expressiva diminuição do desequilíbrio de corrente. Essa redução pode ser atribuída à diminuição da operação de equipamentos trifásicos e monofásicos assimétricos, comuns em ambientes fabris. Durante o intervalo, a carga conectada ao sistema torna-se mais homogênea, reduzindo as diferenças entre as correntes das fases. Além disso, com a geração fotovoltaica atingindo seu pico e compensando grande parte da demanda, o sistema opera com uma configuração mais equilibrada, minimizando os

impactos do desbalanceamento nas correntes. Esse comportamento destaca a influência direta das cargas industriais sobre o perfil de desequilíbrio do sistema. Durante os horários de atividade intensa, a presença de máquinas de solda, motores e equipamentos não lineares conectados de forma desigual às fases aumenta significativamente o desequilíbrio. Por outro lado, em períodos de menor atividade, como o intervalo de almoço, o perfil de corrente torna-se menos assimétrico, resultando em uma operação mais estável.

Figura 32 - Percentual de desequilíbrio de corrente ao longo do dia 25/03/2024.



Fonte: Próprio autor, 2024.

4.7 Análise dos dados coletados:

Embora tenham sido apresentadas análises no tópico “Realizando as Medições”, este item organiza e retoma o que foi obtido nos dados coletados, destacando os principais desafios relacionados à qualidade de energia na unidade fabril da Volga Engenharia. Foram avaliados parâmetros como corrente de neutro, harmônicos de corrente, distorções harmônicas totais, o fenômeno de inversão do fluxo de potência, desequilíbrios e o comportamento do fator de potência.

As medições evidenciaram níveis elevados de corrente no condutor neutro, diretamente associados à presença de harmônicos de sequência zero, como os de 3ª, 9ª e 15ª ordens. Esses harmônicos, comuns em sistemas com cargas não lineares, somam-se no neutro, gerando correntes excessivas que resultam em sobreaquecimento, aumento das perdas elétricas e redução da eficiência do sistema. Em horários de maior atividade industrial, as correntes de neutro alcançaram valores preocupantes, aumentando o risco de desgaste acelerado de transformadores e cabos. Durante os períodos de menor carga, como no intervalo de almoço, observou-se uma redução significativa nas correntes de neutro e nos níveis de harmônicos, indicando a influência direta das cargas industriais nos desequilíbrios do sistema. Os harmônicos de 3ª, 5ª e 7ª ordens foram os mais prevalentes, com a terceira harmônica destacando-se por alcançar até o dobro da corrente fundamental no condutor de neutro. Esse comportamento intensifica os esforços no condutor, aumentando as perdas térmicas e a possibilidade de falhas nos componentes do sistema. As correntes de fase também apresentaram desbalanceamentos significativos. Os inversores da usina fotovoltaica, embora contribuam para a geração de harmônicos, apresentaram impacto menor em relação às cargas industriais, como motores acionados por inversores de frequência e máquinas de solda.

As medições identificaram variações de tensão em momentos críticos, especialmente durante as transições abruptas de carga e nos períodos de maior injeção de potência pela usina fotovoltaica. Estas refletem a dinâmica do sistema elétrico de potência como um todo, abrangendo influências da subestação a montante e de outras unidades consumidoras conectadas ao mesmo ramal. Embora a tensão tenha permanecido dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST, oscilações mais acentuadas foram detectadas durante o retorno das atividades fabris após o intervalo.

O "*Total Harmonic Distortion*" (THD) foi analisado em momentos específicos, como os períodos pré-inversão, o pico da inversão e o pós-inversão do fluxo de potência. Durante os períodos pré e pós-inversão, foi identificado um elevado grau de harmônicos de corrente elétrica, causado pela operação intensiva de cargas não lineares. Durante o pico de inversão, foi observada uma redução nos níveis de THD devido à interrupção temporária das atividades industriais durante o horário de almoço, que reduziu significativamente a contribuição de cargas não lineares.

A inversão do fluxo de potência foi um fenômeno de grande relevância identificado no estudo. No dia 25 de março de 2024, a usina fotovoltaica atingiu um pico de geração de 239,66 kW às 11h45, resultando em uma injeção líquida de 145,31 kW na

rede da concessionária às 11h50. Durante os finais de semana, a redução da carga fabril intensificou esse comportamento. No domingo, 24 de março de 2024, foi registrada uma injeção ainda mais expressiva de 245,54 kW na rede da concessionária. Considerando que o transformador de entrada possui um limite nominal de 300 kVA, essa condição aproximou a potência injetada de sua capacidade máxima, elevando significativamente os riscos de sobrecarga e desgaste acelerado, com potenciais impactos na segurança e na eficiência do sistema.

O monitoramento revelou desequilíbrios tanto de corrente quanto de tensão no sistema elétrico. O desequilíbrio de tensão, embora presente, manteve-se dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST, indicando uma estabilidade aceitável da rede. Por outro lado, o desequilíbrio de corrente apresentou-se significativamente elevado, especialmente durante os momentos de pleno funcionamento da fábrica, quando a operação intensiva de equipamentos trifásicos e monofásicos assimetricamente distribuídos entre as fases agravou a condição. Essa situação resultou em uma corrente de neutro elevada, fortemente influenciada pelo desbalanceamento das cargas, destacando a necessidade de ações para balancear as fases e otimizar a performance do sistema.

O estudo avaliou em detalhe o comportamento do fator de potência em diferentes condições operacionais, revelando padrões importantes para a compreensão e otimização do sistema. Durante a madrugada, o fator de potência apresentou valores negativos, principalmente devido à exportação de potência reativa gerada pela compensação excessiva de bancos de capacitores e inversores fotovoltaicos. Esse comportamento reflete um desbalanceamento entre potência ativa e reativa, mesmo em períodos de baixa demanda de consumo, indicando a necessidade de ajustes dinâmicos nos sistemas de compensação reativa para evitar custos adicionais, como o ERE. Nos momentos de inversão do fluxo de potência, o fator de potência também apresentou valores negativos, mas, neste caso, decorrentes da mudança no sentido da potência ativa gerada pela usina fotovoltaica, enquanto a potência reativa manteve seu padrão. Esse fenômeno destaca a influência da geração distribuída no comportamento dinâmico do sistema e reforça a importância de configurá-la adequadamente para minimizar os impactos sobre a rede elétrica. Durante os períodos de plena atividade industrial, o fator de potência apresentou melhorias consideráveis, resultado do aumento significativo do consumo de potência ativa. Esse aumento reduz a desproporção entre potência ativa e reativa, promovendo uma operação mais eficiente. Entretanto, mesmo nesses períodos, momentos de desequilíbrio

podem surgir devido ao acionamento de cargas não lineares e o desbalanceamento de fases, o que demanda atenção constante para evitar penalidades associadas ao DRE.

4.8 Relatório e proposta de solução:

O estudo conduzido na unidade fabril da Volga Engenharia revelou desafios significativos relacionados à qualidade de energia e ao desempenho do sistema elétrico. As análises realizadas permitiram identificar oportunidades de melhoria que visam aumentar a confiabilidade da operação, reduzir custos e promover a sustentabilidade, alinhando às práticas da empresa aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Entre os principais problemas detectados, destacou-se o comportamento da corrente de neutro, diretamente influenciada por cargas não lineares e desequilíbrios de fase. A elevada corrente de neutro observada em períodos de maior atividade fabril, em grande parte devido aos harmônicos de sequência zero, como os de 3ª ordem, demonstrou a necessidade de intervenções. Essas correntes somam-se no condutor neutro, aumentando as perdas térmicas e acelerando o desgaste de componentes. Soluções como a redistribuição de cargas e a instalação de filtros harmônicos ativos são possíveis aliados para mitigar esses efeitos, reduzindo as perdas e protegendo o transformador, que já opera próximo ao seu limite nominal de 300 kVA.

A inversão do fluxo de potência, registrada em momentos de pico de geração fotovoltaica, representou outro ponto crítico. Em finais de semana, a potência injetada chegou a 245,54 kW, se aproximando da capacidade nominal do transformador, com riscos de sobrecarga. A implementação de sistemas de armazenamento de energia, como baterias, pode ajudar a gerenciar o excedente de geração, enquanto o escalonamento dos horários de intervalo de almoço pode suavizar a transição de cargas, evitando oscilações abruptas e melhorando a estabilidade do sistema, tanto para a própria unidade consumidora em si, quanto para o sistema de potência integrado como um todo. O aumento do número de unidades consumidoras com geração fotovoltaica traz uma mudança significativa na dinâmica do sistema elétrico brasileiro. Atualmente, o sistema conta com a contribuição de grandes turbogeradores na geração hidrelétrica, cuja elevada massa rotativa fornece inércia significativa, garantindo estabilidade de frequência e uma reserva de potência essencial para responder a variações abruptas de carga ou geração. Com a integração crescente de fontes fotovoltaicas, que não possuem elementos rotativos de grande massa para contribuir com a inércia do sistema, há uma tendência de redução

dessa característica. Essa mudança pode tornar o sistema mais suscetível a flutuações de frequência e a eventos transientes, exigindo a adoção de tecnologias complementares, como sistemas de armazenamento de energia e inversores com controle avançado de frequência, para mitigar esses impactos e garantir a confiabilidade da rede.

O fator de potência apresentou desafios em diferentes cenários operacionais. Durante a madrugada, valores negativos foram registrados devido à exportação de potência reativa por inversores e bancos de capacitores, enquanto em períodos de plena atividade industrial, o fator de potência se estabilizou devido ao aumento da potência ativa consumida. No entanto, a exportação de potência reativa pode resultar em custos tarifários adicionais, como ERE e DRE. Ajustes dinâmicos nos capacitores e nos inversores são necessários para evitar a sobrecompensação e otimizar a relação entre potências ativa e reativa. Adicionalmente, o monitoramento contínuo do fator de potência, em tempo real, pode ajudar a identificar padrões críticos e realizar ajustes para tornar a operação otimizada também sob o ponto de vista econômico.

As variações de tensão permaneceram dentro dos limites normativos estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, mas eventos transitórios em momentos de grande variação de carga demonstraram a importância de um acompanhamento em tempo real. Caso sejam identificados valores fora do padrão normativo, a concessionária deve ser acionada para oferecer soluções técnicas, como ajustes na regulação de tensão ou reforço da infraestrutura elétrica. Operar com tensões muito baixas ou acima do permitido pelas normas pode causar sérios problemas, como o sobreaquecimento de maquinário, que pode levar à redução da vida útil ou até mesmo à falha completa de equipamentos. Dispositivos sensíveis, como sistemas eletrônicos de controle, podem ser danificados, enquanto equipamentos eletromecânicos podem apresentar funcionamento inadequado, resultando em perda de eficiência e interrupções nas operações. Essas condições ressaltam a importância de monitorar e corrigir rapidamente qualquer desvio nos níveis de tensão para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema.

A distorção harmônica de tensão, apesar de controlada e dentro dos limites normativos, reforçou a importância de práticas contínuas de monitoramento. Já os harmônicos de corrente apresentaram níveis significativos, principalmente devido à operação de máquinas de solda e inversores de frequência. A substituição de equipamentos antigos por modelos mais eficientes, combinada com a instalação de filtros harmônicos, pode reduzir a poluição harmônica e melhorar a qualidade da energia, e reduzir os custos de produção.

Como consideração final, para este capítulo, é possível dizer que: Ao adotarem se estas propostas de solução, a Volga Engenharia fortalece seu compromisso com os ODS. A integração de sistemas de monitoramento contínuo, alinhada à modernização de equipamentos e ao uso de tecnologias de armazenamento de energia, contribui diretamente para o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), promovendo maior eficiência na geração renovável. A atualização de infraestrutura e o uso de práticas inovadoras refletem o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), enquanto o escalonamento operacional e a gestão eficiente de recursos atendem ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Além disso, essas iniciativas destacariam a Volga Engenharia como uma referência em práticas industriais sustentáveis, demonstrando que a busca pela eficiência energética e pelo uso racional dos recursos também contribui para o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao reduzir a pegada de carbono e promover um uso mais consciente da energia. Com essas ações, a empresa não apenas aprimoraria sua operação, mas também reforçaria sua posição como uma líder em inovação e sustentabilidade no setor industrial.

5 CONCLUSÕES

A realização deste estudo sobre a inversão do fluxo de potência e os parâmetros de qualidade de energia elétrica na unidade fabril da Volga Engenharia proporcionou um ambiente propício para o desenvolvimento de habilidades práticas e para a revisão de conceitos fundamentais adquiridos durante o curso de bacharelado em Engenharia Elétrica. O trabalho destacou a complexidade envolvida no gerenciamento de sistemas elétricos industriais e reforçou a importância de aliar conhecimento teórico à prática para enfrentar desafios técnicos e promover soluções eficazes.

Entre as dificuldades encontradas, destaca-se a impossibilidade de medir a demanda isolada de toda a indústria. As medições realizadas nas barras do Quadro de Transferência Automática (QTA) permitiram apenas a análise líquida da potência gerada pela usina fotovoltaica e consumida pela indústria, dificultando uma visualização detalhada das demandas específicas. Isso ressaltou a necessidade de dispor de instrumentos de medição em pontos estratégicos adicionais para capturar uma visão mais granular e informativa do comportamento das cargas industriais. Adicionalmente, o tratamento dos dados gerados para análise representou outro desafio. Os arquivos extensos, devido ao alto volume de medições e à precisão necessária, demandaram

significativo poder computacional. O dispositivo utilizado para a análise foi estressado ao limite, evidenciando a importância de infraestrutura computacional robusta para lidar com grandes volumes de dados em estudos industriais. Este aspecto destacou a necessidade de investir em ferramentas mais adequadas, que permitam análises rápidas e confiáveis, sem comprometer o desempenho do sistema de análise. Um ponto favorável para as conclusões seria a possibilidade de expandir o estudo para outras unidades consumidoras adjacentes conectadas ao mesmo ramal de alimentação. Essa abordagem permitiria identificar padrões recorrentes no sistema, inclusive relacionados a transitórios de tensão e à quantidade de potência solicitada da subestação de distribuição em momentos de retomada de demanda após inversões do fluxo de potência. Essa análise mais ampla traria informações valiosas para avaliar os impactos coletivos no sistema de potência, especialmente em cenários de alta penetração de geração distribuída.

Apesar desses desafios, o estudo evidenciou medidas efetivas que podem ser implementadas para tornar a operação industrial mais eficiente e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Soluções como redistribuição de cargas, modernização de equipamentos, monitoramento contínuo e escalonamento de operações são estratégias que melhoram a qualidade da energia fornecida e otimizam o consumo energético, promovendo ganhos econômicos e técnicos. Essas ações estão em conformidade com o ODS 7 - Energia Limpa e Acessível, o ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura, e o ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis, reforçando o compromisso da Volga Engenharia com a sustentabilidade. O trabalho também reafirma a importância da inovação e da sustentabilidade na operação industrial, posicionando a Volga Engenharia como referência em práticas industriais responsáveis. Além disso, ao abordar o ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima, as medidas propostas demonstram como a otimização energética pode contribuir para a redução da pegada de carbono e a mitigação de impactos ambientais.

Por fim, este estudo foi uma experiência enriquecedora, permitindo o aprimoramento de competências práticas e teóricas em engenharia elétrica. O ambiente industrial real proporcionou uma oportunidade única para aplicar conceitos acadêmicos e identificar soluções práticas para desafios complexos, reafirmando o papel da engenharia elétrica como ferramenta transformadora na busca por eficiência, inovação e sustentabilidade.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução 1000 da ANEEL, seus direitos sobre energia elétrica, agora num só lugar! (2022) — Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/campanhas/resolucao-1000-da-aneel-seus-direitos-sobre-energia-eletrica-agora-num-so-lugar-2022>. Acesso em: 18 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist) — Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 8 nov. 2024.

ANEEL. Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 3 dez. 2024.

CALIFORNIA ISO. A curva do pato da Califórnia - lições para energias renováveis na Índia? Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/curva-do-pato-da-calif%C3%B3rnia-li%C3%A7%C3%B5es-para-energias-na-botteon>. Acesso em: 20 set. 2024.

FLUKE. Analisadores de Qualidade de Energia Trifásica Série 1770: 1773 1775 177 | Fluke. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analisadores-da-qualidade-de-energia/1773-1775-1777>. Acesso em: 3 nov. 2024a.

FLUKE. Pinças de corrente Fluke i17XX-flex6000 iFlex® | Fluke. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/acessorios/alicates-de-corrente/fluke-i17xx-flex6000-iflex>. Acesso em: 19 nov. 2024b.

GRANDE, C.; PB, –. UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA. 2013.

IEC. IEC 61000-4-30 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods. , 2021. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/68642>. Acesso em: 25 ago. 2024

IEEE. 519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE, , 2022.

MASETTI, C. Revision of European Standard EN 50160 on power quality: Reasons and solutions. ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023 — Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>. Acesso em: 19 maio. 2024.

NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de desenvolvimento sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 10 nov. 2024.

PRODIST. Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL. Sistema Interligado Nacional — Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/sin>. Acesso em: 19 maio. 2024.

VOLGA ENGENHARIA. Home - Volga. Disponível em: <https://volga.com.br/>. Acesso em: 19 nov. 2024.