

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

Jader Fillipe Cabral Pimenta

Diagnóstico de qualidade de energia elétrica em empresa com usina 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): Jader Fillipe Cabral Pimenta

Título do trabalho: Diagnóstico de qualidade de energia elétrica em empresa com usina solar fotovoltaica

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[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 14/01/2025, às 11:04, 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 **Jader Fillipe Cabral Pimenta, Discente**, em 14/01/2025, às 11:08, 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 **5093551** e o código CRC **AFDD44A1**.

Referência: Processo nº 23070.045487/2024-15

SEI nº 5093551



Jader Fillipe Cabral Pimenta

Diagnóstico de qualidade de energia elétrica em empresa com usina 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

Goiânia

2024

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

Fillipe Cabral Pimenta, Jader

Diagnóstico de qualidade de energia elétrica em empresa com
usina solar fotovoltaica [manuscrito] / Jader Fillipe Cabral Pimenta. -
2024.

vi, 51 f.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2024.

Bibliografia. Anexos.

Inclui abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de
tabelas.

1. Sistema Fotovoltaico. 2. Qualidade de Energia Elétrica. 3. Fator
de Potência. 4. Fluxo Reverso de Potência. 5. Medição. 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

Ao(s) 5 dia(s) do mês de Dezembro do do ano de 2024 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Diagnóstico de qualidade de energia elétrica em empresa com usina solar fotovoltaica”, de autoria de Jader Fillipe Cabral Pimenta, 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. Antônio Melo de Oliveira (EMC/UFG), Eng. Tec. Mestre JOSEPHY DIAS SANTOS (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9 (nove) , 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 **Josephy Dias Santos, Técnico de Laboratório**, em 15/12/2024, às 18:32, 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 **Fernando Nunes Belchior, Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2024, às 22:46, 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 09:50, 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 **5041976** e o código CRC **B509B240**.

RESUMO

A energia elétrica é recurso indispensável na sociedade moderna, essencial para o desenvolvimento econômico, social e tecnológico. Sua importância é vital sustentando a operação da infraestrutura básica, como hospitais, transporte, telecomunicações e sistemas de abastecimento, permeando todas as esferas da vida cotidiana, de atividades domésticas a processos industriais. Entretanto, não basta ter acesso à energia, a qualidade do fornecimento é igualmente crucial. Os parâmetros de Qualidade da Energia Elétrica (QEE), como estabilidade de tensão e frequência, controle de harmônicos e fator de potência, influenciam diretamente a confiabilidade e eficiência do fornecimento. O não cumprimento desses padrões pode resultar em quedas de energia, sobrecargas e danos a equipamentos, gerando perdas econômicas e riscos de segurança. Assim, a manutenção de alta QEE é vital para evitar interrupções e assegurar o bem-estar dos usuários. No setor industrial, a importância da QEE é ainda maior devido à complexidade dos processos produtivos. A energia elétrica de alta qualidade é essencial para a operação eficiente de equipamentos de precisão, sistemas automatizados e linhas de produção, pois variações como sobretensões, distorções harmônicas e variações de frequência podem causar paradas imprevistas, reduzir a vida útil dos equipamentos e aumentar os custos de manutenção. A geração de energia por sistemas fotovoltaicos tem sido amplamente adotada em instalações industriais como uma estratégia de redução de custos e por representar uma fonte mais sustentável em termos de preservação ambiental. Essa prática se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), em particular ao ODS 7, que tem como meta garantir o acesso universal à energia acessível, confiável, sustentável e moderna. Desse modo, este estudo analisou a relação entre este tipo de geração e a conformidade dos parâmetros de QEE em uma instalação industrial. Foram abordados conceitos e avaliados aspectos como tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, frequência, desequilíbrio de tensão e fluxo reverso de potência. Dados reais coletados ao longo de uma semana foram tratados graficamente para ilustrar os impactos da injeção de potência da usina nos indicadores de qualidade. A conformidade foi analisada com base nas normas do PRODIST.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico, Qualidade de Energia Elétrica, Fator de Potência, Fluxo Reverso de Potência, Medição e Monitoramento.

ABSTRACT

Electricity is an indispensable resource in modern society, essential for economic, social, and technological development. Its importance lies in sustaining the operation of basic infrastructure, such as hospitals, transportation, telecommunications, and supply systems, permeating all areas of daily life, from household activities to industrial processes. However, mere access to energy is not sufficient; the quality of supply is equally crucial. Parameters of Power Quality (PQ), such as voltage and frequency stability, harmonic control, and power factor, directly influence the reliability and efficiency of the supply. Non-compliance with these standards can result in power outages, equipment overloads, and damage, leading to economic losses and safety risks. Thus, maintaining high PQ is essential to prevent interruptions and ensure user well-being. In the industrial sector, the importance of PQ is even greater due to the complexity of production processes. High-quality electricity is critical for the efficient operation of precision equipment, automated systems, and production lines, as variations such as overvoltage's, harmonic distortions, and frequency fluctuations can cause unexpected stoppages, shorten equipment lifespan, and increase maintenance costs. The electricity photovoltaic generation has been widely adopted in industrial facilities as a cost-reduction strategy and for being a more sustainable source in terms of environmental preservation. This practice aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs) established by the United Nations (UN), particularly SDG 7, which aims to ensure universal access to affordable, reliable, sustainable, and modern energy. This study analyzed the relationship between this type of generation and the compliance with PQ parameters in an industrial facility. Concepts were addressed, and aspects such as steady-state voltage, power factor, harmonic distortions, frequency, voltage imbalance, and reverse power flow were evaluated. Real data collected over a week were graphically processed to illustrate the impacts of power injection from the plant on quality indicators. Compliance was assessed based on PRODIST standards.

Keywords: *Photovoltaic System, Power Quality, Power Factor, Reverse Power Flow, Measurement and Monitoring.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por cuidar dos meus passos e pela generosidade de me cercar de pessoas tão maravilhosas. À minha família sobretudo minha mãe Dalvinha, guerreira, lutadora, sobrevivente que durante a nossa infância/adolescência lutou muito, lecionando três períodos para nos dar a oportunidade de estudar, sempre cobrando, tentando colocar na cabeça de três adolescentes que a educação era a única saída, três tratamentos de câncer, mais de dez anos de luta e mãezinha, você conseguiu. Ao meu pai, Jair, exemplo de homem, que sempre esteve ao nosso lado ensinando com paciência e mostrando o caminho do bem. Aos meus irmãos Pedro e Marcus companheiros de jornada.

À minha esposa Thalita exemplo de companheirismo e lealdade, que me encontrou no fundo do poço, acreditou em mim e me mostrou que a vida poderia ser muito melhor do que a que eu vinha experimentando. À minha filhinha Maitê que dentro da barriga da mamãe já me motiva a buscar o melhor.

À todos os professores passaram pela minha vida e que pouco a pouco contribuíram para minha formação não só acadêmica, como também humana. Sobretudo ao meu orientador Dr. Fernando Nunes Belchior, que sendo um expert no assunto teve muita paciência na orientação deste humilde trabalho e ao Dr. Antônio Melo de Oliveira por ter repassado o conhecimento necessário para a realização deste trabalho.

À instituição UFG, que, mesmo com recursos financeiros limitados, dispõe de um corpo docente de altíssima qualidade, proporcionando-me a oportunidade de cursar este maravilhoso e desafiador curso.

Aos meus colegas e amigos Adtlhyer, Augusto, Jeiel, Artur, Iury que estiveram comigo nessa jornada, me ajudaram bastante nos momentos difíceis, minha eterna gratidão.

À empresa Evolight na pessoa dos seus donos Paula e Eugênio e dos patrimônios Amanda e Junior pela confiança depositada e pelos ensinamentos diários, gratidão.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Símbolo do ODS 7 | 10 |
| Figura 2 - Faixas de tensão em relação à de referência | 13 |
| Figura 3 - Representação das potências com presença de harmônicos | 16 |
| Figura 4 - Esquema de funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede | 23 |
| Figura 5 - Cronologia das diferentes tecnologias de células fotovoltaicas | 23 |
| Figura 6 - Cronologia do desenvolvimento tecnológico da geração de energia fotovoltaica | 24 |
| Figura 7 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil | 26 |
| Figura 8 - Curva do pato | 27 |
| Figura 9 - Objetivos de desenvolvimento sustentável | 28 |
| Figura 10 - Fluxograma da metodologia | 29 |
| Figura 11 - Exemplo de diagrama unifilar simplificado da instalação | 30 |
| Figura 12 - Exemplo de diagrama de instalação do analisador de QEE | 31 |
| Figura 13 - Visão aérea dos módulos fotovoltaicos instalados na empresa Cesar contêiners | 36 |
| Figura 14 - Diagrama unifilar simplificado da instalação | 36 |
| Figura 15 - Analisador de energia modelo DMI F100R Black Box | 37 |
| Figura 16 - Representação do esquema de instalação do analisador de energia | 38 |
| Figura 17 - Tensões de linha | 39 |
| Figura 18 - Relação entre as potências e o FP real durante o dia 22/10/2024 | 40 |
| Figura 19 - FP real soma aritmética e vetorial durante período em que o consumo igual a geração | 41 |
| Figura 20 - $\cos(\varphi)$ média ponderada durante período em que o consumo iguala a geração | 41 |
| Figura 21 - Indicadores de distorção harmônica | 42 |
| Figura 22 - Fator de desequilíbrio de tensão | 43 |
| Figura 23 - Frequência da rede durante o período de medição | 44 |
| Figura 24 - Fluxo de potência ativa durante o dia 22/10/2024 | 45 |
| Figura 25 - Fluxo de potência ativa durante dia 27/10/2024 | 45 |
| Figura 26 - Forma de cálculo das potências segundo o analisador de QEE | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV | 14 |
| Tabela 2 - Indicadores de distorção harmônica | 17 |
| Tabela 3 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental) | 19 |
| Tabela 4 - Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão | 21 |

SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

SCEE - Sistema de Compensação de Energia Elétrica

SEP - Sistema Elétrico de Potência

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 12 |
| 2.1. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE) | 12 |
| 2.1.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE | 13 |
| 2.1.2. FATOR DE POTÊNCIA | 14 |
| 2.1.4. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO | 19 |
| 2.1.5. VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA | 21 |
| 2.2. GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA | 22 |
| 2.2.1. HISTÓRICO NO BRASIL | 25 |
| 2.3. FLUXO REVERSO DE POTÊNCIA | 26 |
| 2.4. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL | 27 |
| 2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 28 |
| 3. METODOLOGIA | 29 |
| 3.1. DIAGRAMA UNIFILAR DA INSTALAÇÃO | 30 |
| 3.2. DEFINIÇÃO DO LOCAL DE MEDIÇÃO | 30 |
| 3.3. INSTALAÇÃO DO ANALISADOR DE QEE | 31 |
| 3.4. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS | 32 |
| 3.4.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE | 32 |
| 3.4.2. FATOR DE POTÊNCIA | 32 |
| 3.4.3. DISTORÇÃO HARMÔNICA | 33 |
| 3.4.4. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO | 34 |
| 3.4.5. VARIAÇÕES DE FREQUÊNCIA | 34 |
| 3.4.6. FLUXO REVERSO DE POTÊNCIA | 34 |
| 3.5. ANÁLISE DOS DADOS | 34 |
| 3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 35 |
| 4. ESTUDO DE CASO | 35 |
| 4.1. DIAGRAMA UNIFILAR DA INSTALAÇÃO | 36 |
| 4.2. DEFINIÇÃO DO LOCAL DE MEDIÇÃO | 37 |
| 4.3. INSTALAÇÃO DO ANALISADOR DE QEE | 37 |
| 4.4. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS | 38 |
| 4.5. ANÁLISE DOS DADOS | 39 |
| 4.5.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE | 39 |
| 4.5.2. FATOR DE POTÊNCIA | 40 |

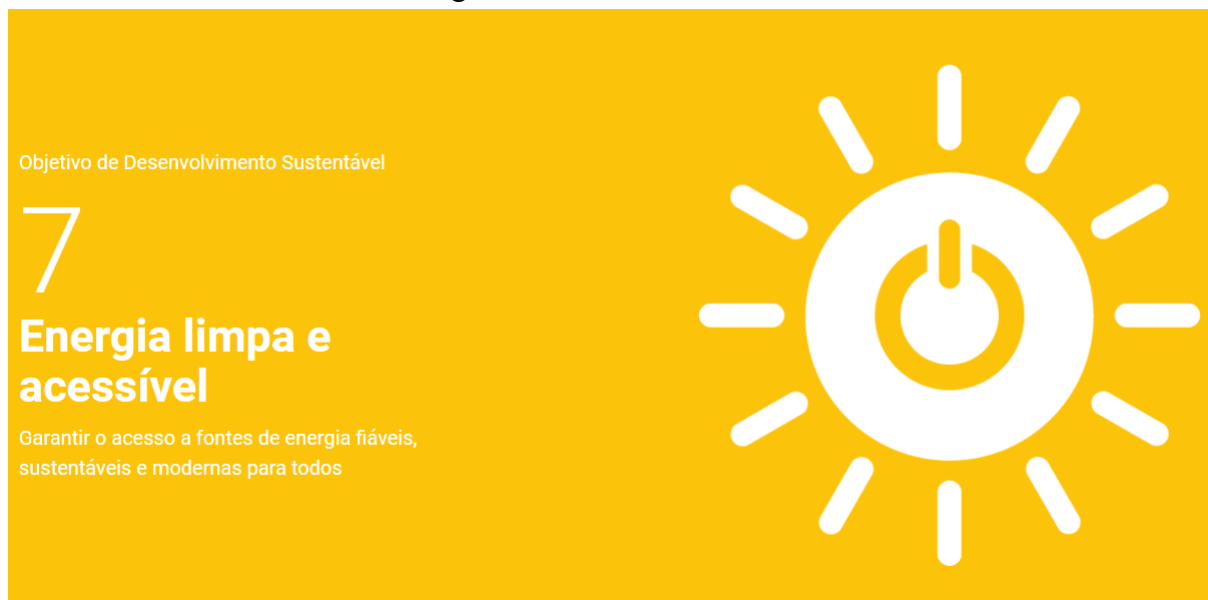
| | |
|---|-----------|
| 4.5.3. DISTORÇÃO HARMÔNICA | 42 |
| 4.5.4. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO..... | 43 |
| 4.5.5. VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA..... | 43 |
| 4.5.6. FLUXO REVERSO DE POTÊNCIA | 44 |
| 4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 46 |
| 5. CONCLUSÕES | 47 |
| 6. REFERÊNCIAS | 48 |
| 7. ANEXO | 51 |

1. INTRODUÇÃO

Desde a instalação do primeiro gerador fotovoltaico na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1997 (UFSC, 2022a), vários fatores têm impulsionado o crescimento da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil. Entre eles, destacam-se o aumento da demanda por energia, o avanço na regulamentação do setor, a redução de custos e o aprimoramento tecnológico dos equipamentos.

Além dos fatores mencionados, as preocupações ambientais estabelecidas nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como no ODS 7 (NAÇÕES UNIDAS, 2024) cujo símbolo é apresentado na Figura 1, que define como meta garantir o acesso universal à energia acessível, confiável, sustentável e moderna, impulsionaram o crescimento da adoção de fontes renováveis, como a energia solar. Essa expansão levou o país a alcançar, em setembro de 2024, uma capacidade instalada de 48.244 MW (ABSOLAR, 2024). Esse crescimento é evidente quando comparado aos dados de dezembro de 2019, que indicavam uma capacidade de geração de 2.409 MW, representando um aumento superior a 2.000% no período (SANTOS, 2019).

Figura 1 - Símbolo do ODS 7



Fonte:(NAÇÕES UNIDAS, 2024)

No entanto, a inserção da geração fotovoltaica também levanta questões sobre os impactos na qualidade da energia elétrica (QEE) em sistemas elétricos, especialmente em relação aos níveis de tensão, ao fator de potência, ao fluxo reverso de potência e às distorções harmônicas.

Diversos estudos abordam esses temas, como o de (DE CASTRO et al., 2018) que avalia sistematicamente os impactos da mini e microgeração no sistema de distribuição; (BRITO et al., 2021a) estuda os impactos da geração distribuída fotovoltaica na tensão elétrica de uma rede de distribuição em baixa tensão; (MOTTA et al., 2018), discute o fator de potência em edifícios com sistemas fotovoltaicos; (SANTOS, 2019), analisa um sistema fotovoltaico implementado em um centro de aulas, entre diversos autores.

A necessidade de investigar os desafios específicos da geração distribuída e seus impactos em diferentes contextos motivou este trabalho, que foca no contexto industrial, onde a implementação de sistemas fotovoltaicos se tornou uma solução viável para redução de custos.

Assim, esta pesquisa avalia os parâmetros de qualidade de energia em uma instalação industrial com sistema fotovoltaico, considerando a conformidade com normas vigentes e analisando aspectos como tensão em regime permanente, fator de potência, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica, variação de frequência e fluxo de potência. O estudo visa contribuir para o entendimento da relação entre geração fotovoltaica e indicadores de qualidade de energia em instalações industriais.

O trabalho seguirá a seguinte estrutura: no capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica, com uma abordagem conceitual dos parâmetros estudados e os limites definidos pelas normas brasileiras; no capítulo 3, será detalhada a metodologia aplicada ao estudo de caso; no capítulo 4, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a análise; e no capítulo 5, a conclusão destacará a importância dessa pesquisa e discutirá os resultados alcançados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A crescente demanda por fontes de energia renováveis traz a preocupação com os possíveis problemas que esses modelos de geração poderão causar ao sistema elétrico e, conseqüentemente, aos equipamentos ligados a ele. Neste trabalho, será realizado um estudo sobre como a geração solar fotovoltaica poderá impactar os indicadores de qualidade de energia em uma instalação industrial.

Para a realização deste estudo, serão apresentados neste capítulo os parâmetros de qualidade de energia estabelecidos pela ANEEL, o modelo de geração de energia elétrica fotovoltaica, o conceito de fluxo reverso de potência e o enquadramento do trabalho nos ODS.

2.1. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

A qualidade da energia elétrica está diretamente relacionada a fenômenos que afetam a amplitude e a forma das ondas de tensão e corrente, além de desvios na frequência, que podem causar falhas ou comprometer o desempenho dos equipamentos (SANTOS, 2019). O tema é amplamente discutido nas bibliografias de (SANTOSO, 2012) e (FUCHS; MASOUMM, 2023).

Pode-se dizer que um dos critérios mais relevantes na qualidade de energia é a forma de onda da tensão que deve ser senoidal pura, sem variações de amplitude ou frequência, como se fosse proveniente de uma fonte de potência infinita. Pode se afirmar também que se uma instalação elétrica possui má qualidade de energia, isso significa que as ondas de tensão e/ou corrente apresentam desvios significativos de formato, amplitude, defasamento, frequência capazes de prejudicar o funcionamento ou provocar falhas nos equipamentos.

A necessidade de definir limites e parâmetros para a qualidade da energia elétrica (QEE) resultou na regulamentação do tema pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2020). Desde a sua aprovação em 2008, essa norma foi revisada 13 vezes, refletindo a contínua preocupação com a QEE, com revisões como a 5ª e a 9ª sendo atualizadas antes mesmo de sua entrada em vigência (ANEEL, 2024).

Esse módulo define terminologias, caracteriza fenômenos e estabelece indicadores e limites para a conformidade da tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão.

Neste trabalho, serão analisados os seguintes indicadores de QEE: tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão e variação de frequência.

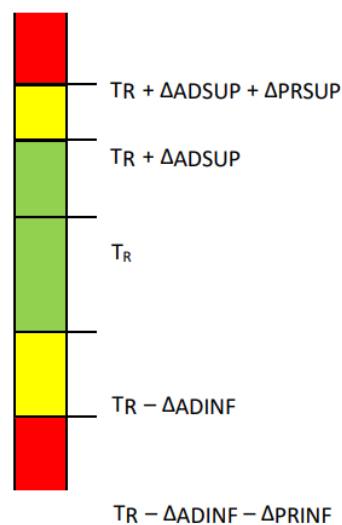
2.1.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Tensão em regime permanente é a tensão elétrica que se mantém constante ou dentro de uma faixa de variação aceitável após o sistema elétrico atingir um estado de equilíbrio estável. Em outras palavras, é a tensão que prevalece durante o funcionamento normal de um sistema, sem a influência de perturbações transitórias, como picos ou quedas de energia repentinas.

Essa estabilidade é crucial para o bom desempenho dos equipamentos elétricos, assim o PRODIST, em seu módulo 8, define os limites para a variação da tensão em regime permanente.

A classificação da tensão se dá segundo faixas em torno da tensão de referência (T_R), conforme a Figura 2:

Figura 2- Faixas de tensão em relação à de referência



Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2021a)

sendo:

- T_R : Tensão de Referência que deve ser a nominal ou a contratada, de acordo com o nível de tensão do ponto de conexão;
- Faixa Adequada de Tensão: intervalo entre $(T_R - \Delta ADINF)$ e $(T_R + \Delta ADSUP)$;
- Faixas Precárias de Tensão: intervalo entre $(T_R + \Delta ADSUP)$ e $(T_R + \Delta ADSUP + \Delta PRSUP)$ ou intervalo entre $(T_R - \Delta ADINF - \Delta PRINF)$ e $(T_R - \Delta ADINF)$;

- Faixas Críticas de Tensão: valores acima de $(TR + \Delta ADSUP + \Delta PRSUP)$ ou abaixo de $(TR - \Delta ADINF - \Delta PRINF)$.

Existem limites diferentes para cada faixa de tensão fornecida pela distribuidora. Como no presente estudo a tensão fornecida pela distribuidora é de 13.800 V, serão mostrados os limites para este nível de tensão, onde o seu limite mínimo adequado é 12.834 V e o limite máximo adequado é 14.490 V. A tabela 1 retrata os limites para esse nível de tensão.

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV

| Tensão de Atendimento | Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR) |
|-----------------------|--|
| Adequada | $0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$ |
| Precária | $0,90TR \leq TL < 0,93TR$ |
| Crítica | $TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$ |

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2024)

Observando esses limites e com as relativas medições são realizados os cálculos dos indicadores DRP e DRC que indicam o percentual do tempo em que determinada unidade consumidora permanece com tensão precária e com tensão crítica, respectivamente. A forma de cálculo destes indicadores são apresentadas nas equações 2.1 e 2.2, respectivamente:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (2.1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (2.2)$$

Em que nlp e nlc correspondem, respectivamente, ao número de leituras do maior valor entre as fases que estão nas faixas precárias e nas faixas críticas. Caso os indicadores estejam com os limites impróprios, a distribuidora deverá ressarcir financeiramente o cliente. Compreende-se como limite impróprio quando os valores de DRP e DRC ultrapassam os valores de 3% e 0,5%, respectivamente.

2.1.2. FATOR DE POTÊNCIA

Determinados equipamentos, como motores elétricos, fornos a arco e transformadores, necessitam de energia reativa para operar, a qual pode ser suprida por diversas fontes no sistema

elétrico, atuando individualmente ou simultaneamente (MAMEDE FILHO, 2017). Entre essas fontes, destacam-se geradores, motores síncronos e bancos de capacitores. Além disso, as próprias linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica podem ser consideradas fontes de energia reativa, devido às suas reatâncias.

Embora a energia reativa não realize trabalho útil, ela é essencial para a magnetização dos campos indutores de motores. No entanto, apesar de não gerar trabalho, a energia reativa pode sobrecarregar o sistema de fornecimento de energia elétrica (FUCHS; MASOUMM, 2023).

Nesse contexto, o fator de potência é um indicador da eficiência no uso da energia elétrica, sendo crucial controlá-lo adequadamente em instalações consumidoras. Esse controle é importante não apenas do ponto de vista energético, mas também porque as concessionárias monitoram esse índice por meio de seus sistemas de medição. Caso o fator de potência esteja abaixo do desejado, menor que 0,92 indutivo durante o dia, ou menor que 0,92 capacitivo durante a madrugada, poderá resultar em cobranças adicionais significativas nas contas de energia elétrica.

Portanto, é essencial implementar sistemas de correção que permitam ajustar e manter o fator de potência acima do mínimo exigido pelas normas vigentes. Considerando que a maioria das cargas industriais tem características indutivas o método mais comum de controle do fator de potência é a utilização de bancos de capacitores.

Segundo o módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2024) o valor do fator de potência deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa ou das respectivas energias, utilizando-se as seguintes equações 2.3, 2.4:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.3)$$

$$FP = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (2.4)$$

Sendo FP o fator de potência na frequência fundamental que também pode ser chamado de fator de potência de deslocamento (FP_D) ou ($\cos \varphi$), P e Q as potências ativa e reativa na frequência fundamental, EA e ER as energias ativa e reativa na frequência fundamental.

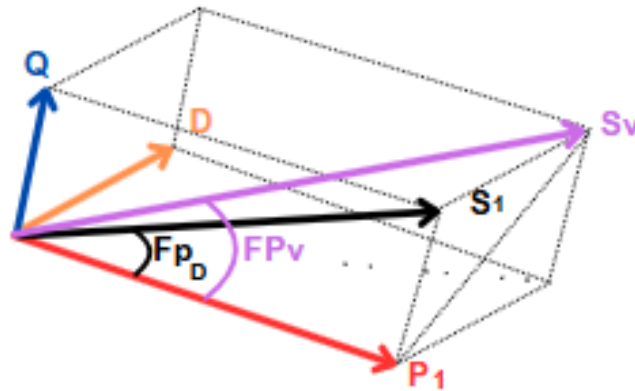
É importante ressaltar que, caso o sistema esteja conectado a cargas não lineares, tais como retificadores, inversores etc., o valor que representa o fator de potência real poderá ser divergente do valor obtido através da equação 2.3 se o equipamento considerar para cálculo do fator de potência apenas as potências relativas à frequência fundamental. Sendo assim o fator de potência verdadeiro (FPv), que considera a parcela harmônica das potências, pode ser obtido

de acordo com a equação 2.5 (MOTTA et al., 2018), (FUCHS; MASOUMM, 2023), na literatura de (DECKMANN; POMILIO, 2024) estão apresentados questionamentos quanto a maneira que a norma brasileira aborda o cálculo do fator de potência e os efeitos do modelo adotado para taxação em sistemas com geração solar.

Na referência (IEEE Std. 1459, 2010) são encontrados todos os conceitos e as formas de cálculo detalhados das potências sob condições de distorção.

$$FP_V = \frac{P_V}{S_V} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + D_1^2 + S_H^2 + D_V^2}} \quad (2.5)$$

Figura 3 - Representação das potências com presença de harmônicos



Fonte: Adaptado de (MOTTA et al., 2018)

Sendo P_V e S_V as potências ativa e aparente totais considerando todas as frequências, P_1 e S_1 as potências ativa e aparente na frequência fundamental, P_H e S_H as potências ativa e aparente das componentes harmônicas e D_1 e D_V são respectivamente potências de distorção de corrente e tensão. A figura 3 é a representação gráfica demonstrativa entre FP_D e FP_V que são os cossenos dos ângulos marcados.

2.1.3. DISTORÇÃO HARMÔNICA

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2024).

Segundo (DUGAN et al., 2002) as componentes harmônicas surgem a partir da existência de cargas não lineares, equipamentos baseados em arco elétrico e devido a não linearidade da curva $v \times i$ em equipamentos baseados em circuitos magnéticos.

A norma (IEEE Std. 1459, 2010) contém as definições das potências na presença de componentes harmônicas e explora os efeitos dessas componentes na capacidade de realizar trabalho.

No trabalho de (FUCHS; MASOUMM, 2023) são descritos os principais impactos negativos causados pelas componentes harmônicas no sistema elétrico, tais como o aumento de perdas por aquecimento, dificuldades no funcionamento de disjuntores e fusíveis, diminuição da vida útil de máquinas elétricas rotativas e o mau desempenho de equipamentos como computadores, entre outros.

Assim, o módulo 8 do PRODIST regulamenta os indicadores limites para resguardar dos problemas causados pela distorção harmônica os consumidores e o sistema de distribuição da concessionária, esses indicadores são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Indicadores de distorção harmônica

| Descrição | Símbolo |
|--|----------------|
| Distorção harmônica individual de tensão de ordem h | $DTT_h\%$ |
| Distorção harmônica total de tensão | $DTT\%$ |
| Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 | $DTT_p\%$ |
| Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 | $DTT_i\%$ |
| Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 | $DTT_3\%$ |
| Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas | $DTT_{95\%}$ |
| Valor do indicador $DTTP\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas | $DTT_p_{95\%}$ |
| Valor do indicador $DTTI\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas | $DTT_i_{95\%}$ |
| Valor do indicador $DTT3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas | $DTT_3_{95\%}$ |

fonte: (ANEEL, 2024)

As equações para o cálculo dos indicadores $DTT_h\%$, $DTT_\%$, $DTT_p\%$, $DTT_i\%$, $DTT_3\%$ são as seguintes 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10:

$$DTT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 [\%] \quad (2.6)$$

Sendo V_h a tensão harmônica de ordem h , h a ordem harmônica individual e V_1 a tensão fundamental medida.

$$DTT_\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (2.7)$$

Sendo h todas as ordens harmônicas de 2 até $hmax$ que é a ordem harmônica máxima, conforme classe do equipamento de medição utilizado (classe A ou S).

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (2.8)$$

Sendo h todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, \dots$) e hp a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (2.9)$$

Sendo h todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ($h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, \dots$) e hi = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h3} V_h^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (2.10)$$

Sendo h todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, \dots$) e $h3$ a máxima ordem harmônica múltipla de 3;

Os limites de distorção harmônica correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição e estão representados na tabela 3 (ANEEL, 2024):

Tabela 3 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

| Indicador | Tensão nominal | | |
|-------------|------------------------------|---|---|
| | $V_{in} \leq 2,3 \text{ kV}$ | $2,3 \text{ kV} < V_{in} < 69 \text{ kV}$ | $69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$ |
| DTT95% | 10% | 8% | 5% |
| DTT_p 95% | 2,5% | 2% | 1% |
| DTT_i 95% | 7,5% | 6% | 4% |
| DTT_3 95% | 6,5% | 5% | 3% |

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2024)

2.1.4. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O conceito de desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferente de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições.

Em um sistema trifásico equilibrado, considerando a sequência positiva de fases e a referência a fase “a”, tem-se a em pu as tensões equilibradas conforme as equações 2.11, 2.12 e 2.13:

$$V_a = 1, 0 \angle 0^\circ \quad (2.11)$$

$$V_b = 1, 0 \angle -120^\circ \quad (2.12)$$

$$V_c = 1, 0 \angle +120^\circ \quad (2.13)$$

As origens desses desequilíbrios ocorrem geralmente devido a má distribuição dos consumidores monofásicos nos circuitos do sistema de distribuição, assim as cargas monofásicas mal distribuídas geram tensões de sequência negativa. Esse problema se intensifica quando consumidores alimentados por sistemas trifásicos têm uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Tensões desequilibradas também podem resultar da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos (PAULILO, 2013).

O conceito de componentes simétricas define que qualquer sistema de tensões trifásicas pode ser substituído pela soma de três sistemas simétricos de mesma frequência. As equações 2.14, 2.15, 2.16, apresentam as fórmulas para cálculo das tensões de sequência positiva e negativa segundo o método das componentes simétricas.

$$V^+ = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.14)$$

$$V^- = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.15)$$

$$a = 1, 0 \angle 120^\circ \quad (2.16)$$

Segundo (PAULILO, 2013) o porquê de o grau de desequilíbrio ser definido pela relação entre os módulos da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva se deve ao fato de que um conjunto trifásico de tensões equilibradas possui apenas componentes de sequência positiva. Enquanto o aparecimento de componentes de sequência zero se dá devido a assimetria das tensões de fase. As tensões de linha, cujas componentes de sequência zero são sempre nulas, permanecem equilibradas. Entretanto, a presença de componentes de sequência negativa também introduz uma assimetria nas tensões de linha.

As principais consequências do desequilíbrio de tensão em sistemas elétricos resultam do aumento de corrente em fases específicas, provocando sobreaquecimento de motores elétricos e outros equipamentos trifásicos (FUCHS; MASOUMM, 2023). Esse aquecimento excessivo compromete a eficiência operacional, reduz a vida útil dos dispositivos, eleva o consumo de energia e intensifica a necessidade de manutenção.

Motores sujeitos a tensões desequilibradas podem apresentar vibrações anormais e ruídos (DECKMANN; POMILIO, 2024), afetando a estabilidade do equipamento e acelerando o desgaste mecânico. Além disso, o desequilíbrio de tensão pode acionar sistemas de proteção, resultando em desligamentos automáticos destinados a proteger os equipamentos, o que leva a interrupções na produção e potenciais prejuízos financeiros.

Outro impacto significativo é o aumento de correntes de retorno que percorrem o condutor neutro, ampliando as perdas elétricas e gerando aquecimento adicional nos cabos e transformadores. Essas consequências evidenciam a importância de monitorar e manter o equilíbrio de tensão em sistemas elétricos para garantir a eficiência, a segurança e a durabilidade dos equipamentos.

Posto isto, o já referido módulo do PRODIST (ANEEL, 2024) define as expressões para o cálculo do fator de desequilíbrio de tensão. Ele é calculado a partir da equação 2.17, que consirera V_+ a magnitude da tensão eficaz de sequência positiva na frequência fundamental e V_- a Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa na frequência fundamental.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (2.17)$$

Porém existem diversos métodos de cálculo com resultados similares sendo as equações 2.18 e 2.19 alternativas para o mesmo, onde V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} são as magnitudes das tensões eficazes de linha na frequência fundamental e FD95% o Valor do indicador FD% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.18)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.19)$$

Os limites que correspondem ao máximo de fator de desequilíbrio desejável a ser observado no sistema de distribuição encontram se na tabela 4:

Tabela 4 – Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão

| Indicador | Tensão nominal | |
|-----------|---------------------------|---------------------------------------|
| | $V_n \leq 2,3 \text{ kV}$ | $2,3 \text{ kV} < V_n < 230\text{kV}$ |
| FD95% | 3,0% | 2,0% |

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2024)

2.1.5. VARIACÃO DE FREQUÊNCIA

A frequência de um sistema elétrico está intimamente ligada à velocidade de rotação dos geradores síncronos conectados à rede. Problemas na operação dos geradores ou falhas nos sistemas de transmissão ou distribuição podem gerar questões relacionadas à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), especialmente no que diz respeito à frequência.

Outra preocupação recente está relacionada ao aumento da penetração da geração solar fotovoltaica no Sistema Elétrico de Potência (SEP), o que pode trazer grandes dificuldades para a operação dele. Isso pode ocorrer devido o modelo de geração fotovoltaica não possuir inércia síncrona, como os sistemas com geradores síncronos que conseguem equilibrar variações entre geração e carga com o armazenamento de energia cinética por parte dos mesmos, essa ausência de inercia síncrona pode levar a uma maior instabilidade na frequência do sistema (PICCOLI et al., 2021).

Para a análise da QEE, o Módulo 8 do PRODIST, em sua Seção 7 (ANEEL, 2021a), estabelece os padrões de fornecimento relacionados à frequência que devem ser cumpridos pela distribuidora. Segundo o documento, o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas a ele devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Além disso, é estabelecido um prazo de 30 segundos para que as instalações de geração garantam o retorno da frequência à faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, permitindo a recuperação do equilíbrio carga-geração. Caso o equilíbrio não seja restabelecido, o sistema sofrerá cortes. Durante distúrbios, a frequência não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz. Em condições extremas, a frequência pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos; da mesma forma, a frequência pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos.

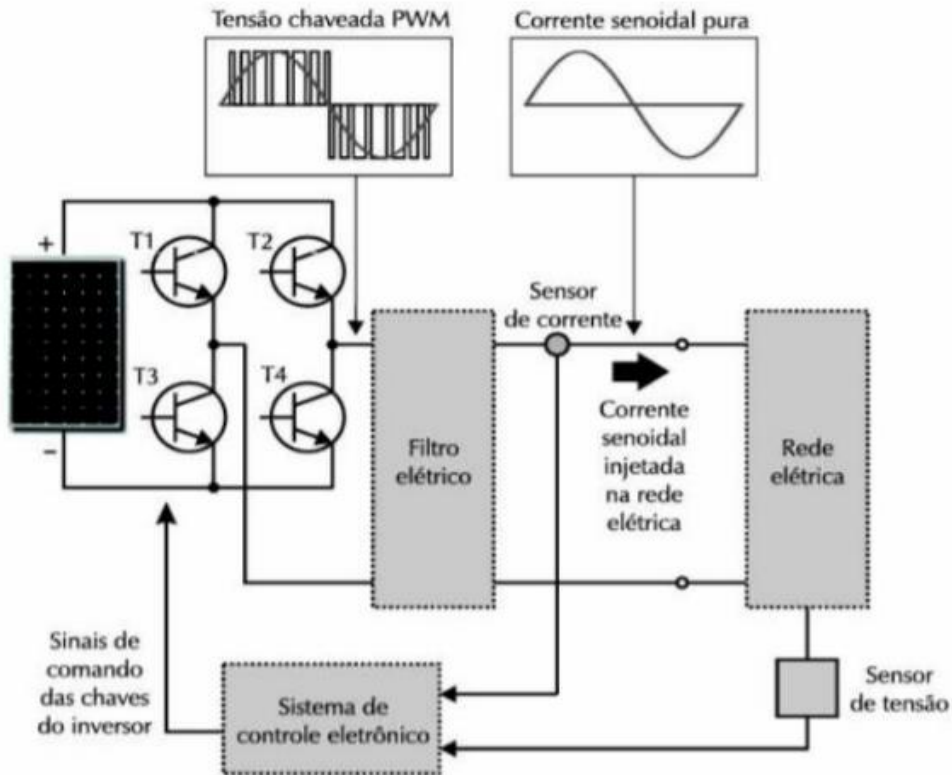
2.2. GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é gerada por meio da conversão direta da luz solar em eletricidade, utilizando um processo conhecido como Efeito Fotovoltaico descoberto em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel (PORTAL SOLAR, 2023). A célula fotovoltaica, que é o elemento básico desse processo, é um dispositivo feito de material semicondutor, como o silício. Outras composições encontradas são disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe) (PINHO; GALDINO, 2014). Hoje existem diversas técnicas utilizadas na melhoria de rendimento das células com destaque para a célula multijunção para concentração (III-V MJ Conc) que utiliza na sua composição semicondutores dos antigos grupos 3 e 4 da tabela periódica melhorando sua performance. Quando exposta à luz solar, a célula fotovoltaica gera uma corrente elétrica, essa corrente elétrica CC é convertida em CA a partir de inversores de frequência e posteriormente pode ser utilizada para alimentar dispositivos elétricos, ser armazenada ou injetada na rede elétrica, a figura 4 apresenta o esquemático de funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede.

Durante muitos anos devido às limitações tecnológicas, esse modelo de geração era economicamente inviável. Porém, a constante busca por alternativas de energia elétrica mais sustentáveis do que aquelas dependentes da queima de combustíveis fósseis e o desenvolvimento tecnológico na área dos semicondutores tornou a geração de energia elétrica solar fotovoltaica em um ramo muito atrativo e em constante desenvolvimento. Pode-se

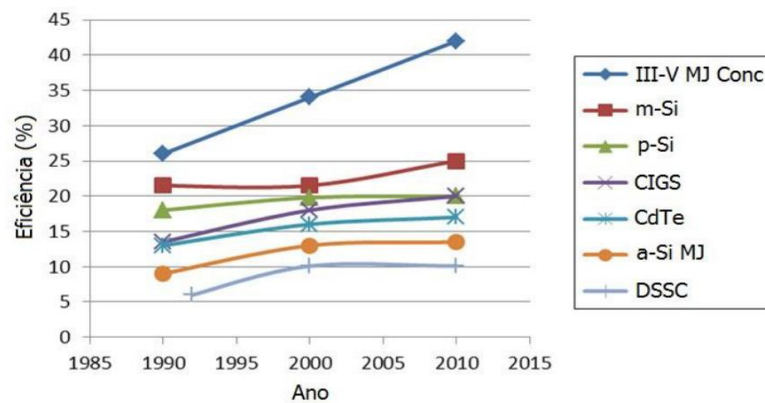
observar esse desenvolvimento na figura 5 que compara a eficiência das principais células fotovoltaicas produzidas de 1900 a 2010. Já a figura 6 apresenta a evolução da tecnologia ao longo do tempo.

Figura 4-Esquema de funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte:(GINU, 2023)

Figura 5- Cronologia das diferentes tecnologias de células fotovoltaicas



Fonte: Adaptada de (PINHO; GALDINO, 2014)

Figura 6 - Cronologia do desenvolvimento tecnológico da geração de energia fotovoltaica

| | |
|------|---|
| 1800 | Descoberta do Selênio (Se) (Berzelius) |
| 1820 | Preparação do Silício (Si) (Berzelius) |
| 1840 | Efeito Fotovoltaico (Becquerel) |
| 1860 | Efeito Fotocondutivo no Se (Smith) |
| 1880 | Retificador de Ponto de Contato (Braun) Efeito Fotocondutivo no Se (Adams & Day) Célula Fotovoltaica de Se (Fritts/Uljanin) |
| 1900 | Fotosensibilidade em Cu-Cu ₂ O (Hallwachs) |
| 1910 | Efeito Fotovoltaico com Barreira de Potencial (Goldman & Brodsky) |
| 1920 | Monocristal a partir do Si Fundido (Czochralski) Retificador de Cu-Cu ₂ O (Grondahl) |
| 1930 | Célula Fotovoltaica de Cu-Cu ₂ O (Grondahl & Geiger) Teorias de Bandas em Sólidos (Strutt/Brillouin/Krönig & P) Teorias de Células com Barreiras V e H (Schottky et al) |
| 1940 | Teoria da Difusão Eletrônica (Dember) Aplicações Fotométricas (Lange) 1% de Eficiência em Células de Sulfeto de Tálio (Nix & Treptow) |
| 1950 | Crescimento de Células Fotovoltaicas com Junção (Ohl) Teoria da Junções <i>p-n</i> (Shockley) |
| 1954 | Célula Solar de Si (Pearson, Fuller & Chapin) |
| 1955 | Junções <i>p-n</i> Difundidas (Fuller) |
| 1960 | Célula Solar de CdS (Reynolds et al) Teorias de Células Solares (Piann & Roosbroeck/Prince) |
| 1962 | O "Bandgap" e a Eficiência das Células (Loferski, R. & W) Teoria da Resposta Espectral, Mecanismo de Perdas (Wolf) Efeitos de Resistência em Série (Wolf & Rauschenbach) Células de Si <i>n/p</i> Resistentes a Radiação (Kesperis & M.) Contatos Evaporados de Ti-Ag (BTL) |
| 1973 | Células Violeta com 15,2% de Eficiência |
| 1976 | Células de Silício Amorfo (a-Si) |
| 1992 | Células Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) de 24% de Eficiência |
| 1998 | Células de Silício Monocristalino com Eficiência de 24,7% |
| 1999 | Potência Instalada Acumulada Atinge o Primeiro GWp |
| 2002 | Potência Instalada Acumulada Dobra em Relação a 1999 |
| 2005 | Eficiência Superior a 20% para Células em Silício Policristalino |
| 2006 | Células Multijunção com Rendimentos Superiores a 34% Células de Tripla Junção Superam os 40 % de Eficiência |
| 2008 | Módulos de c-Si Dominam 87% do Mercado (John Wiley & Sons, 2011) Expansão de Módulos de Filme Fino (a-Si, CdTe e módulos CIS) |
| 2009 | Mais de 23 GWp Instalados (EPIA) |
| 2011 | Mais de 70 GWp de Potência Instalada Acumulada (EPIA, 2012) |
| 2012 | Potência Instalada Acumulada Supera 100 GWp (EPIA, 2013) |

Fonte: Adaptada de (PINHO; GALDINO, 2014)

Os sistemas fotovoltaicos podem apresentar-se em três configurações: a *on-grid*, que são os sistemas conectados à rede de distribuição e que geralmente se encontram próximos à carga, como é o caso do sistema objeto deste estudo; a *off-grid*, na qual o sistema está desconectado da rede de distribuição e opera de forma autônoma a partir de um banco de baterias; e, por fim, os sistemas híbridos, que estão conectados à rede de distribuição e também a bancos de baterias, combinando ambas as configurações (DIAS SANTOS, 2019). Os trabalhos de (VILLALVA, 2012), (MESSENGER; VENTRE, 2010), (PINHO; GALDINO, 2014) apresentam os aspectos técnicos do modelo de geração fotovoltaica, com as características de todos os tipos de sistemas existentes atualmente.

2.2.1. HISTÓRICO NO BRASIL

Até meados de 2011 a geração solar fotovoltaica no Brasil era ínfima, baseava-se principalmente em pequenas usinas baseadas em universidades e centros de pesquisa como por exemplo o da UFSC que foi o primeiro sistema fotovoltaico integrado a uma edificação e conectado à rede elétrica pública do Brasil instalado em 1997 (UFSC, 2022). Foi a partir da publicação da Resolução Normativa nº 482 (ANEEL, 2012) que estabeleceu as condições de acesso e o sistema de compensação de energia, além de regras claras para o setor é que o panorama de crescimento do setor se estabeleceu.

Posteriormente, essa legislação foi atualizada pela Resolução Normativa nº 687/2015, que ampliou e detalhou as regras do sistema de compensação de energia elétrica e os limites para microgeração (até 75 kW) e minigeração (de 75 kW a 5 MW). Com o aprimoramento das normativas foi publicada em dezembro de 2021, a Resolução nº 1000/2021 (ANEEL, 2021) que substituiu várias normativas anteriores da ANEEL, consolidando-as em um único documento.

Além disso, a Lei nº 14.300/2022 (BRASIL, 2022) criou o Marco Legal da Geração Distribuída no Brasil, formalizando os direitos e deveres dos consumidores-geradores, consolidando o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e regulamentando a transição para as novas regras. Posteriormente foi lançada a Resolução nº 1.098/2024 (ANEEL, 2024b) que complementa as regras do setor no âmbito da inversão do fluxo de potência.

Essa constante criação de resoluções reflete o esforço regulatório para adaptar o mercado de geração distribuída às novas realidades econômicas e tecnológicas do setor no Brasil.

Outro fator relevante ao desenvolvimento do setor foi a redução de custos de equipamentos principalmente devido ao avanço tecnológico, ao aumento da concorrência entre as fabricantes de equipamentos, e a implementação de subsídios governamentais.

A figura 7, representa o panorama de crescimento do setor no Brasil, que passou de 8 MW em 2012 para 48.244 MW de potência instalada em setembro de 2024, equivalente a 20,2% da matriz elétrica, tornando-se a segunda maior fonte de geração do país (ABSOLAR, 2024).

Figura 7 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil



Fonte: (ABSOLAR, 2024)

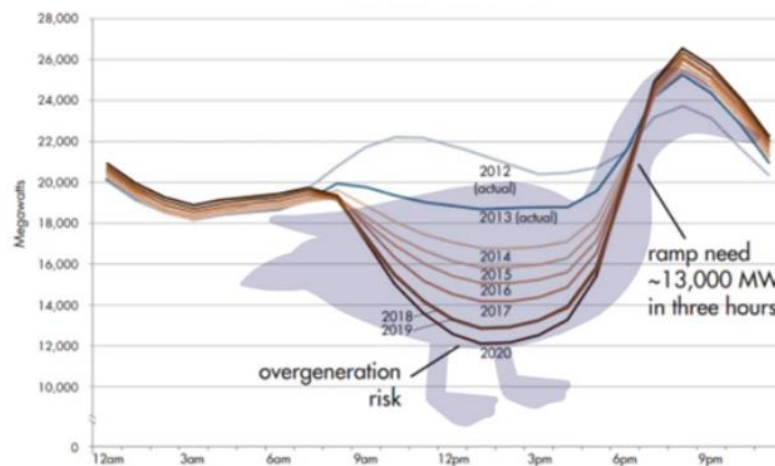
2.3. FLUXO REVERSO DE POTÊNCIA

Outra característica que será estudada neste trabalho é a ocorrência de fluxo reverso de potência, que se dá quando a geração supera o que é consumido, tornando o antes agentes passivos em agentes fornecedores de potência ao sistema da distribuidora. Essa inserção de potência traz diversas dificuldades às concessionárias e podem ser causa de falhas em dispositivos de proteção e reguladores de tensão (BRITO et al., 2021b).

Esse fenômeno pode ser observado graficamente na Curva do Pato apresentada na figura 8, em sistemas elétricos que incorporam grande quantidade de energia solar fotovoltaica. Durante o período diurno, a alta geração de energia solar reduz a demanda de energia da rede convencional, resultando em um perfil de carga com uma depressão acentuada, conhecida como

a "barriga do pato". Período no qual ocorrem em várias partes do sistema o fluxo reverso onde as instalações passam de consumidoras a fornecedoras de potência ao sistema. Conforme o sol se põe e a geração solar diminui drasticamente, a demanda por eletricidade da rede convencional aumenta rapidamente, formando o "pescoço do pato". Esse comportamento acentua a necessidade de fontes de geração flexíveis e soluções de armazenamento de energia para garantir a estabilidade da rede durante essas transições.

Figura 8 - Curva do pato



Fonte: Adaptado de (DE CASTRO et al., 2018)

2.4. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), apresentados na Figura 9, foram definidos em 25 de setembro de 2015 por 193 líderes mundiais, que se comprometeram com 17 metas globais com o propósito de, nos 15 anos subsequentes, erradicar a pobreza extrema, combater as desigualdades e as injustiças, além de mitigar as mudanças climáticas (NAÇÕES UNIDAS, 2024).

O enfoque na utilização de energia proveniente de fontes renováveis na indústria, bem como o estudo de padrões de QEE que promovam melhor aproveitamento da energia e reduzam os defeitos causados aos equipamentos, alinha este trabalho a diversos ODS. Os principais tópicos diretamente relacionados ao objeto de estudo do trabalho são:

- ODS 7.2: Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global.

- ODS 8.2: Atingir níveis mais elevados de produtividade econômica por meio da diversificação, modernização tecnológica e inovação, com ênfase em setores de alto valor agregado e em setores intensivos em mão de obra.
- ODS 9.1: Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos.
- ODS 12.2: Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.(NAÇÕES UNIDAS, 2024)

Figura 9 - Objetivos de desenvolvimento sustentável



Fonte: (NAÇÕES UNIDAS, 2024)

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os principais indicadores de qualidade de energia elétrica, focando em tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão e variação de frequência. Foi destacada a relevância desses indicadores para a avaliação do desempenho e da estabilidade de sistemas elétricos, especialmente em redes que incorporam geração distribuída por meio de sistemas fotovoltaicos.

A análise levantou suposições de como a integração de sistemas fotovoltaicos às redes elétricas pode impactar esses indicadores, devido à intermitência na geração de energia e à injeção de correntes não lineares que podem aumentar a distorção harmônica e o desequilíbrio

de tensão. O fator de potência também pode ser afetado pela natureza variável da geração solar, exigindo uma gestão mais sofisticada para manter a eficiência da rede.

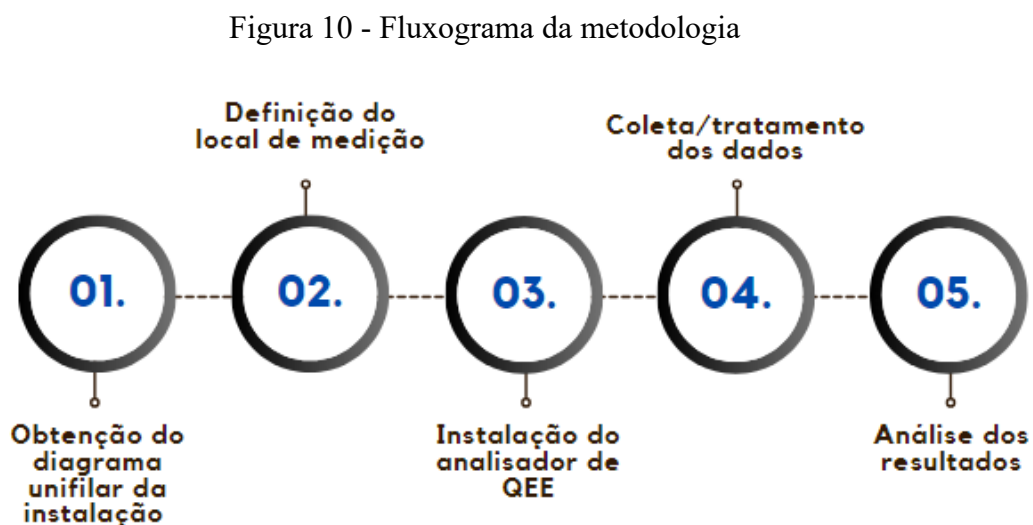
No contexto da legislação brasileira, foi observado que normas como a ANEEL nº 482/2012 (ANEEL, 2012) e suas atualizações estabelecem critérios específicos para a operação de sistemas fotovoltaicos, com o objetivo de mitigar os impactos negativos sobre a qualidade da energia. Essas regulamentações impõem limites para a distorção harmônica, variações de tensão e frequência, garantindo que a integração da geração distribuída seja compatível com a operação segura e eficiente do sistema elétrico nacional.

Os conceitos apresentados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo e estudos que avaliem a conformidade dos indicadores de qualidade, essenciais para garantir a estabilidade e a confiabilidade das redes elétricas em um cenário de crescente penetração de sistemas fotovoltaicos.

Por fim, este capítulo apresentou os tópicos dos ODS relacionados à temática abordada, evidenciando a importância de estudos e do estabelecimento de boas práticas voltadas para o aumento da eficiência dos processos e a redução do desperdício de energia.

3. METODOLOGIA

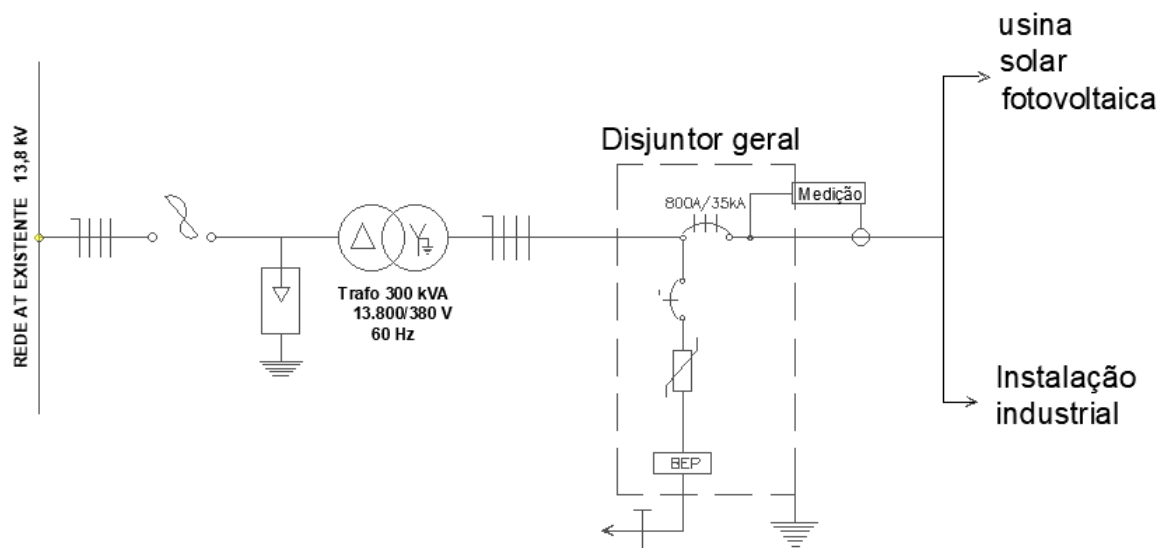
A realização das análises dos indicadores de QEE seguirá o fluxograma apresentado na figura 10, onde estão destacadas as etapas que vão desde a análise do diagrama unifilar e escolha do local apropriado para instalação do medidor até a apresentação dos resultados obtidos.



3.1. DIAGRAMA UNIFILAR DA INSTALAÇÃO

Para iniciar o processo de coleta de dados, é necessária a obtenção do diagrama unifilar da instalação, com o intuito de definir o local de medição, a partir da escolha do tipo de análise que será realizada. A Figura 11 apresenta um local onde o analisador de QEE pode ser alocado em uma instalação industrial para a obtenção de dados relativos aos parâmetros de QEE.

Figura 11 - Exemplo de diagrama unifilar simplificado da instalação



Fonte: Autoria Própria

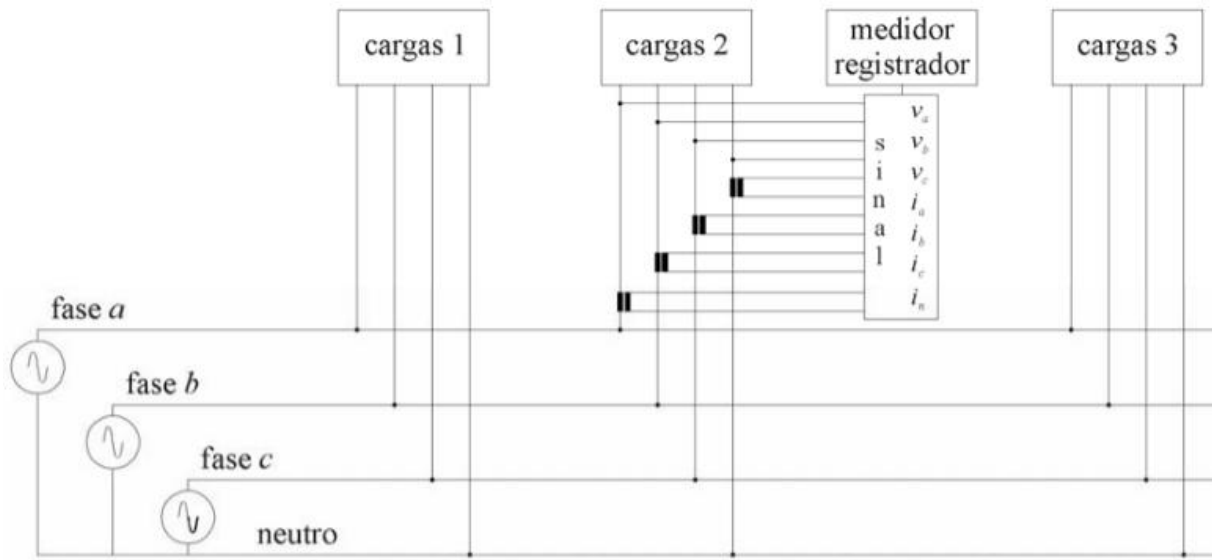
3.2. DEFINIÇÃO DO LOCAL DE MEDIÇÃO

A escolha do local de medição varia de acordo com o tipo de estudo a ser realizado, inclusive com a utilização de medidores em diversos locais, conforme a necessidade. O analisador pode ser conectado a um ponto próximo às cargas, permitindo uma análise mais detalhada de como elas interagem com o sistema elétrico, ou pode ser instalado na entrada de energia, no lado de baixa tensão do transformador, para coletar dados gerais sobre o comportamento da instalação industrial em relação aos indicadores de QEE.

3.3. INSTALAÇÃO DO ANALISADOR DE QEE

A instalação do analisador de QEE seguirá o modelo apresentado na Figura 12, que representa o diagrama de instalação genérico de um equipamento de medição.

Figura 12 - Exemplo de diagrama de instalação do analisador de QEE



Fonte: Adaptado de (MELO, 2006)

Um instrumento de medição portátil normalmente utilizará bobinas de Rogowski para a medição das correntes conectadas a cada fase e ao neutro, seguindo o sentido de instalação indicado no equipamento. Para a obtenção dos dados de tensão, serão conectadas garras metálicas em todas as fases e no neutro, ligando o analisador ao sistema em paralelo.

Segundo (ANEEL, 2024) os equipamentos de medição devem permitir, no mínimo, a apuração das seguintes informações:

- valores dos indicadores individuais associados à tensão em regime permanente;
- tabela de medição de tensão em regime permanente;
- histograma de tensão em regime permanente;
- valores dos indicadores associados com a distorção harmônica total de tensão;
- valores dos indicadores de distorção harmônica individual de tensão até $h_{máx}$;
- valores do fator de desequilíbrio de tensão;
- valores dos indicadores de flutuação de tensão;
- duração e amplitude dos eventos de variação de tensão de curta duração, indicando a data e hora de início de cada evento.

3.4. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados serão coletados por meio do *software* do analisador e tratados no aplicativo Excel, de modo que os parâmetros de QEE, previamente apresentados no capítulo 2, sejam obtidos conforme a normativa brasileira estabelecida no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2024). O equipamento de coleta de dados será único para todos os parâmetros, ele opera segundo o princípio da amostragem digital, sendo sua classe S.

3.4.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Para a avaliação de conformidade dos níveis de tensão em regime permanente serão tomadas 1008 leituras em intervalos consecutivos de 10 minutos, que correspondem a uma semana (sete dias) de dados dos valores da tensão eficaz conforme indica a ANEEL (ANEEL, 2024).

Para as medições de nível de tensão em regime permanente, na ocorrência de variações temporárias de tensão (distúrbios com tempo de duração inferior a 3 minutos e superior a 3 segundos) ou de interrupções de longa duração (distúrbios com tempo de duração superior a 3 minutos), o intervalo de medição de 10 (dez) minutos deve ser expurgado e substituído por igual número de leituras válidas, sendo opcional o expurgo de intervalos com variações momentâneas de tensão (distúrbios com tempo de duração inferior ou igual a 3 segundos).

A partir da obtenção desses dados, será gerado um gráfico contendo os valores das tensões entre fases obtidas durante o período de medição. O gráfico conterá os limites críticos e precários para melhor visualização de possíveis desvios de conformidade. Caso forem encontrados valores fora dos padrões estabelecidos, serão calculados os indicadores DRP e DRC presentes nas equações 2.1 e 2.2, para avaliação da porcentagem de desvio do parâmetro.

3.4.2. FATOR DE POTÊNCIA

Para a análise do fator de potência, serão obtidos os dados referentes às potências ativa direta e reversa, bem como do fator de potência real, utilizando-se da base de dados do analisador de QEE instalado. Os dados serão coletados durante um dia de operação normal da indústria, com um período de agregação de 15 minutos. Adicionalmente, será registrada a potência ativa injetada pela usina ao longo do mesmo intervalo de tempo, com dados obtidos através do aplicativo de monitoramento dos inversores.

Com base nos dados de geração e nas potências ativa direta e reversa captadas pelo analisador, será elaborada uma estimativa da potência ativa consumida pela carga durante o período de medição, conforme a equação 3.1.

$$P_{ac} = P_{ad} + P_{ag} - P_{ar} \quad (3.1)$$

Sendo P_{ac} a potência ativa consumida pela carga, P_{ad} potência ativa direta, P_{ag} a potência ativa da geração da usina, P_{ar} potência ativa reversa.

Após a coleta de todos os dados mencionados, será gerado um gráfico no *software* Excel, contendo as informações obtidas.

Serão apresentados gráficos extraídos do aplicativo do analisador, com menores intervalos de agregação de dados, e com dados do fator de potência real e o fator de potência de deslocamento ($\cos\phi$). Esses gráficos serão referentes a intervalos em que ocorrerem as maiores variações do fator de potência, visando uma análise mais detalhada dos eventos e a comparação entre os dados referentes ao fator de potência real e ao fator de potência de deslocamento.

3.4.3. DISTORÇÃO HARMÔNICA

O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo das expressões relacionadas com a distorção harmônica total de tensão deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até pelo menos a 40ª ordem harmônica.

O conjunto de leituras para gerar os indicadores da qualidade do produto de regime permanente referente às distorções harmônicas devem compreender o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de agregação) de 10 minutos cada, salvo as que eventualmente sejam expurgadas (ANEEL, 2024).

Para as medições de distorções harmônicas na ocorrência de variações de tensão de curta duração ou de interrupções de longa duração, o intervalo de medição de 10 (dez) minutos deve ser expurgado e substituído por igual número de leituras válidas.

Após a aquisição de 1008 registros válidos de medição, deve ser obtido um conjunto de valores para FD%, DTT%, DTTp%, DTTi%, DTT3% que, devidamente tratados, conduzirá aos valores dos indicadores estatísticos FD95%, DTT95%, DTTp95%, DTTi95%, DTT₃95% esses indicadores serão obtidos com base nas equações 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10. Por fim será feito um gráfico com os indicadores FD95%, DTT95%, DTTp95%, DTTi95%, DTT₃95% e a comparação entre os valores obtidos e seus limites apresentados na tabela 3.

3.4.4. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O desequilíbrio de tensão obtido através do analisador é medido e calculado em conformidade à norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2021), utilizando o método das componentes simétricas para detectar o grau de desequilíbrio entre as fases. Para comparação com os parâmetros estabelecidos no módulo 8 do PRODIST(ANEEL, 2024), os dados obtidos terão período de agregação de dez minutos, conforme estabelece a norma e o total de dados coletados será de 1008 dados no período de uma semana.

A partir dos dados coletados no analisador será realizado um gráfico, com os valores em percentual do desequilíbrio de tensão, para comparação entre os valores obtidos e os indicadores de conformidade contidos na tabela 4.

3.4.5. VARIAÇÕES DE FREQUÊNCIA

Para obtenção dos dados de variação de frequência a frequência deve ser registrada continuamente, com qualquer desvio da frequência nominal (60 Hz) sendo capturado instantaneamente. O analisador fornece dados de frequência com período mínimo de agregação de 5 segundos. Com base neles será elaborado um gráfico com os valores de frequências obtidos durante uma semana, indicando o maior e o menor valor e comparando a conformidade aos critérios mostrados na seção 2.1.5.

3.4.6. FLUXO REVERSO DE POTÊNCIA

Para a verificação do fluxo reverso de potência, serão utilizados os dados de potência ativa direta e potência ativa reversa coletados pelo analisador, bem como os dados de geração da usina, fornecidos pelo aplicativo dos inversores. Com base nesses dados, será realizado um levantamento do comportamento da carga e da relação entre as potências ao longo de dois dias: um dia de funcionamento normal da indústria e um dia em que não haja produção.

3.5. ANÁLISE DOS DADOS

Após a coleta e o tratamento dos dados, estes serão comparados aos indicadores de QEE apresentados na seção 2.1 e presentes no Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2024), para que os resultados obtidos possam ser classificados como estando dentro ou fora dos padrões estabelecidos.

3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo detalhou a metodologia para avaliar os indicadores de qualidade da energia elétrica em uma instalação industrial. O processo inicia-se com a obtenção do diagrama unifilar da instalação, que permitirá compreender a configuração do sistema elétrico e identificar os pontos mais adequados para medições. A escolha do local de medição é essencial para garantir que os dados reflitam, de forma representativa, o impacto da geração fotovoltaica na indústria.

A instalação do analisador de qualidade de energia seguirá as normas técnicas, assegurando a captura precisa de indicadores como tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão e variação de frequência. Os dados serão coletados continuamente e tratados para normalização, permitindo uma visualização clara dos resultados.

A análise buscará revelar como a geração fotovoltaica influencia a qualidade da energia elétrica, examinando as variações em relação aos limites estabelecidos pela legislação brasileira, de modo a identificar melhorias e desafios adicionais introduzidos pela expansão desse modelo de geração.

Essa metodologia proporcionará uma compreensão aprofundada dos impactos da geração fotovoltaica na qualidade da energia elétrica em uma instalação industrial.

4. ESTUDO DE CASO

A usina base do estudo está instalada em uma empresa de adequação de contêineres para utilização na construção civil, cujos módulos fotovoltaicos da instalação são mostrados na figura 13 e o sistema é composto por dois inversores com potência total de 220 kW, da marca Sungrow modelo SG110CXP2 de 110 kW cada.

Na instalação industrial estão presentes alguns equipamentos com cargas não lineares como inversores de frequência para acionamento de motores de indução e algumas máquinas de solda.

Para controle de potência reativa a instalação conta com um banco de capacitores com controlador automático do fator de potência de 100 kvar.

As formas de cálculo das potências segundo o algoritmo do analisador de QEE estão apresentadas na figura 26 no anexo.

Figura 13 - Visão aérea dos módulos fotovoltaicos instalados na empresa Cesar contêiners

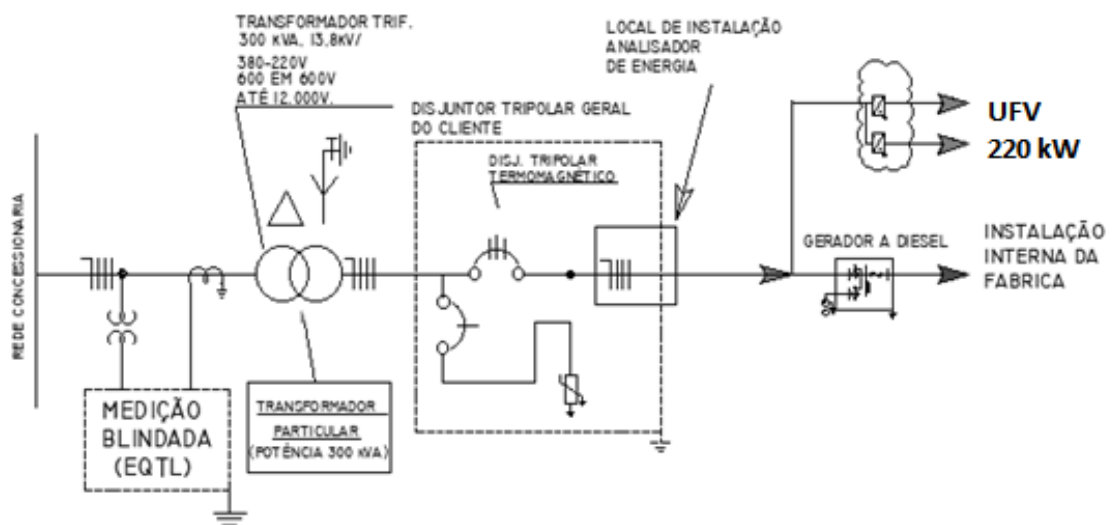


Fonte: Adaptada de Google Maps.

4.1. DIAGRAMA UNIFILAR DA INSTALAÇÃO

O diagrama unifilar mostrado na figura 14 apresenta onde estão localizadas as cargas (instalação interna da fábrica), as usinas de geração solar fotovoltaica (UFV), o local de instalação do analisador de energia e a entrada de energia do cliente.

Figura 14 - Diagrama unifilar simplificado da instalação



Fonte: Autoria Própria

4.2. DEFINIÇÃO DO LOCAL DE MEDIÇÃO

O local de medição do estudo foi no lado de baixa do transformador, na entrada da indústria de acordo com a figura 14. Essa definição se deu devido a disponibilidade do equipamento e como forma de avaliar o possível impacto da geração de energia solar, nos parâmetros de QEE, considerando interação entre a geração e as cargas instaladas.

4.3. INSTALAÇÃO DO ANALISADOR DE QEE

O estudo realizado através de dados obtidos de um analisador de energia modelo DMI F100R BLACK BOX da fabricante ISSO digital apresentado figura 15.

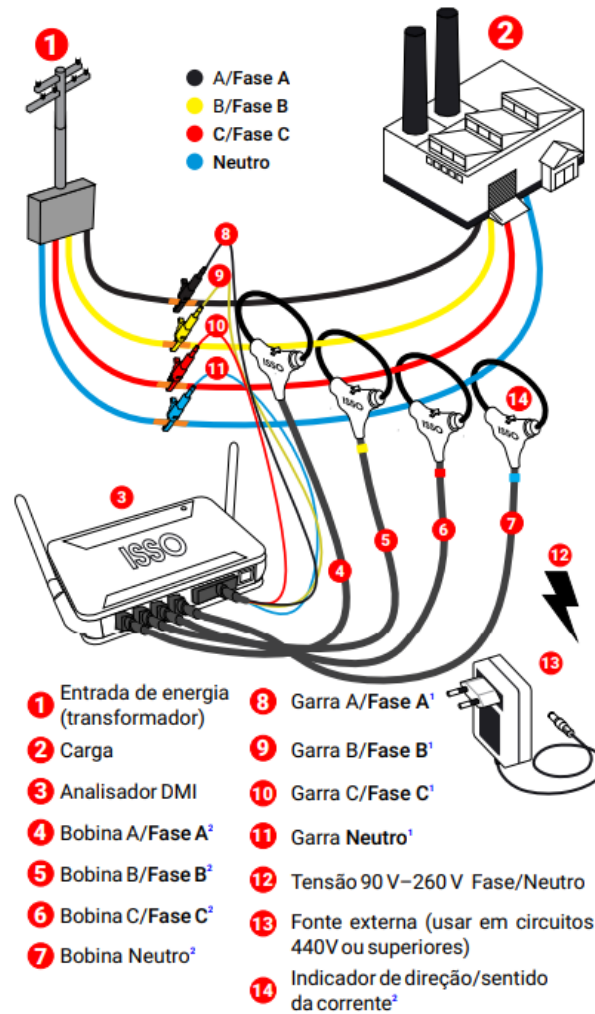
Figura 15 - Analisador de energia modelo DMI F100R Black Box



Fonte: (ISSO DIGITAL, 2023)

Na figura 16 é apresentado o modelo de instalação do analisador de energia DMI F100R BLACK BOX que consta em seu manual.

Figura 16 - Representação do esquema de instalação do analisador de energia



Fonte: (ISSO DIGITAL, 2023)

4.4. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

O processo de coleta de dados foi realizado em um intervalo de sete dias consecutivos, com funcionamento normal das atividades industriais e pleno funcionamento do sistema de geração solar, no período de 21/10/2024 a 28/10/2024. Os parâmetros tensão em regime permanente, distorção harmônica e desequilíbrio de tensão foram organizados no aplicativo de planilha Excel com agrupamento de dez minutos. Os dados do fator de potência tiveram um período de agregação de 15 minutos, para que pudesse ser feita uma relação entre eles e os dados de potência injetada, obtidos no aplicativo dos inversores, que tinha 15 minutos como período mínimo de agregação.

Já o parâmetro variação de frequência foi avaliado a partir de dados relativos a intervalos de cinco segundos.

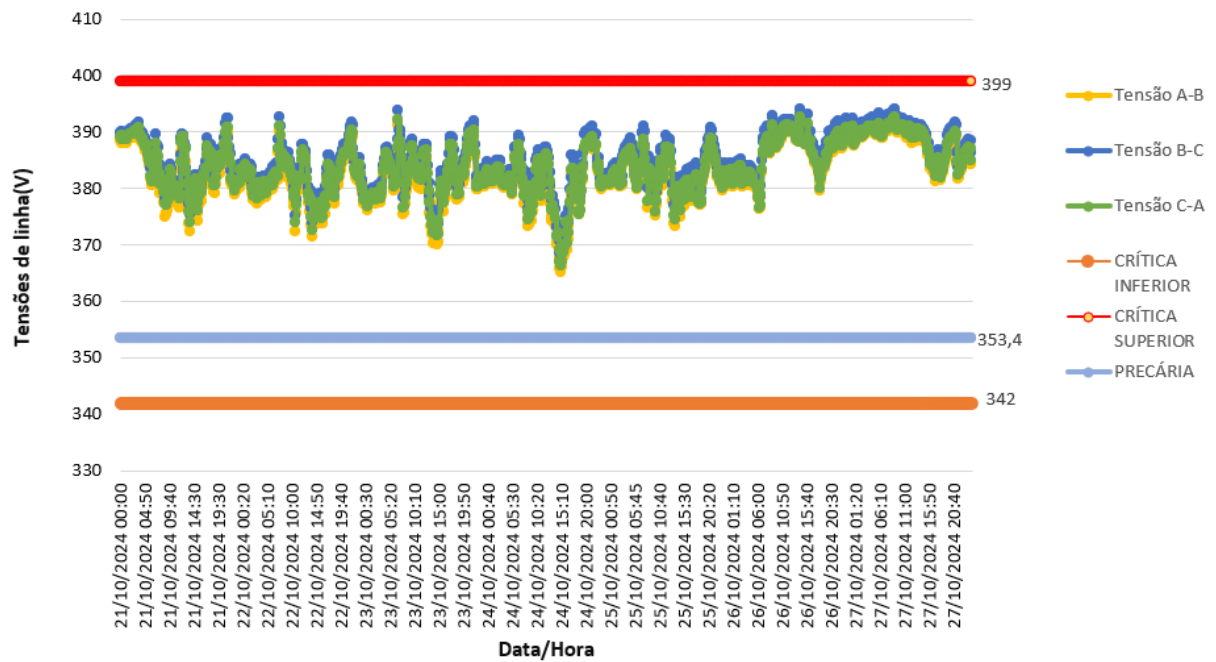
4.5. ANÁLISE DOS DADOS

As análises de conformidade dos parâmetros são baseadas nos indicadores de QEE apresentados no capítulo 2 .

4.5.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Os dados referentes aos níveis de tensão da instalação industrial são apresentados na Figura 17. Na referida figura, também estão indicadas as linhas que representam os níveis de tensão crítico e precário, conforme estabelecido pelas normas do PRODIST (ANEEL, 2024), com seus limites previamente apresentados na Tabela 1.

Figura 17 - Tensões de linha



Fonte: Autoria própria

Observa-se que, durante o período de medição, não foram registrados valores de tensão em regime permanente fora dos padrões de conformidade estabelecidos pelo PRODIST(ANEEL, 2024) sendo a maior tensão medida 395,99V dia 23/10/2024 às 07:01:15 e a menor 354,57V dia 24/10/2024 às 16:11:30. Assim, tanto os indicadores DRP quanto DRC indicam 0% de desvios de conformidade. O aparelho de medição não fornece o histograma referente a tensão em regime permanente fornecendo apenas os dados de máximo e mínimo e a média tensão medida dentro do período. Quanto a variações de curta duração (inferiores a 3 minutos) o

equipamento só registra a ocorrência dos distúrbios e guarda os dados por um período de 30 dias, durante o período de análise não foi registrada nenhuma ocorrência do tipo.

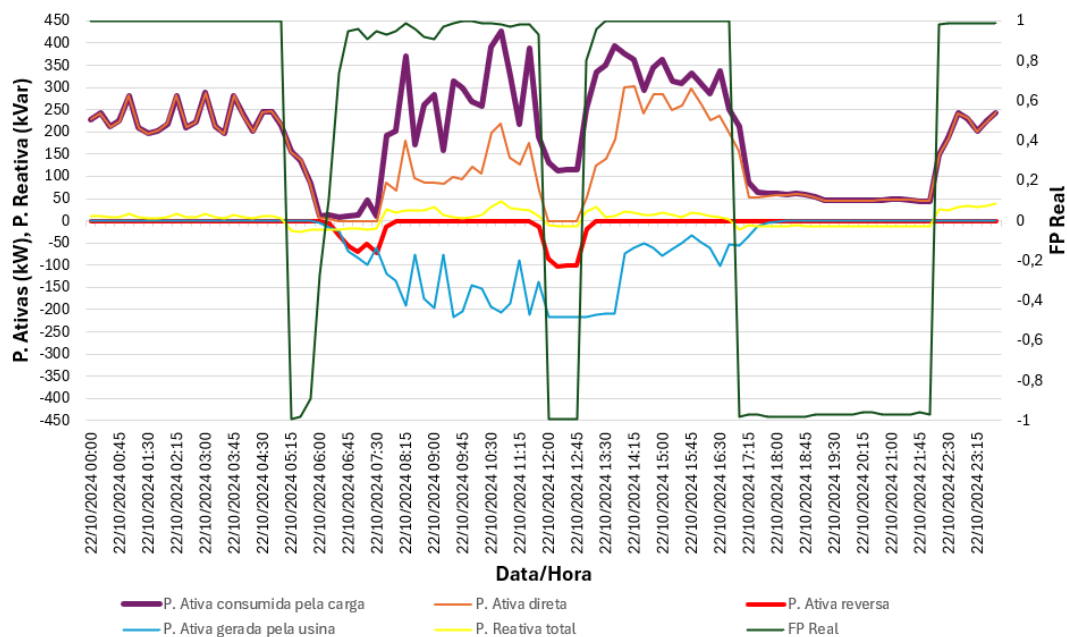
4.5.2. FATOR DE POTÊNCIA

A Figura 18 apresenta um gráfico que ilustra as potências ativas direta e reversa, a potência reativa e o fator de potência, obtidos a partir dos dados coletados pelo analisador de energia. Por sua vez, a potência ativa gerada pela usina foi determinada com base nos dados de geração fornecidos pelo aplicativo de monitoramento do inversor.

Os valores correspondentes à potência ativa consumida pela carga foram calculados a partir da relação entre as potências ativas direta, reversa e a gerada pela usina, a forma de cálculo está mostrada na equação 3.1. Para uma melhor visualização da característica do fator de potência, foi adotada a convenção de atribuir sinal negativo ao fator de potência capacitivo.

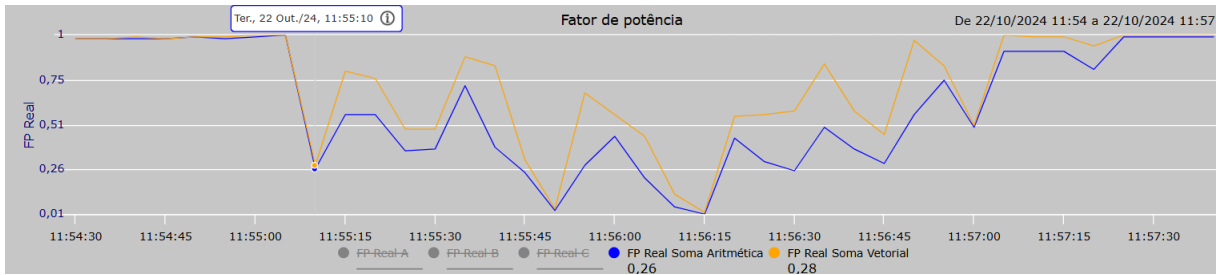
Os gráficos apresentados nas figuras 19 e 20 apresentam o comportamento do fator de potência real calculado de forma aritmética e de forma vetorial e o fator de potência de distorção ($\cos \phi$) calculado pelo analisador como média ponderada, durante o período de 3 minutos e 15 segundos quando há uma significativa redução de consumo de potência ativa e a usina passa a suprir toda necessidade de potência ativa da carga.

Figura 18 - Relação entre as potências e o FP real durante o dia 22/10/2024



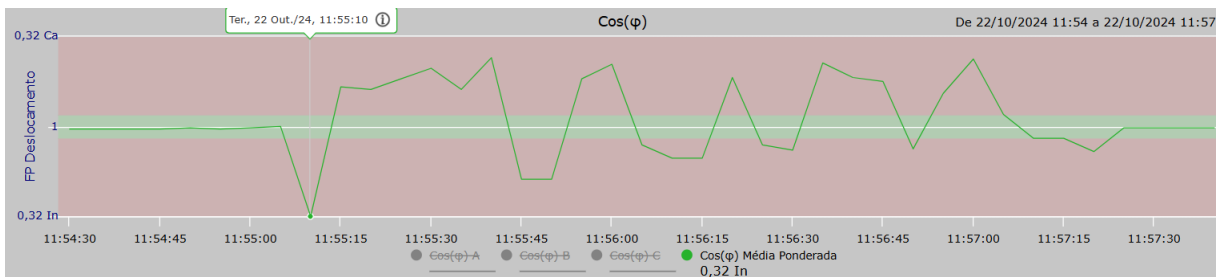
Fonte: Autoria própria

Figura 19 - FP real soma aritmética e vetorial durante período em que o consumo igual a geração



Fonte: Adaptada de (ISSO DIGITAL, 2023)

Figura 20 – $\cos(\varphi)$ média ponderada durante período em que o consumo iguala a geração



Fonte: Adaptada de (ISSO DIGITAL, 2023)

Ao analisar a potência reativa total medida pelo analisador, observa-se que, durante todo o período de medição, ela apresenta uma estabilidade considerável, alternando de indutiva para capacitiva quando ocorre uma redução na potência solicitada pela carga, e de capacitiva para indutiva com o aumento da potência solicitada pela carga. Esse comportamento é esperado e indica que a carga de natureza indutiva reduziu ou aumentou sua demanda por potência reativa, enquanto o banco de capacitores passou a fornecer potência reativa capacitiva, com o objetivo de estabilizar a circulação de potência reativa proveniente da rede elétrica da concessionária.

Outro comportamento observado foi a redução do fator de potência nos momentos em que a potência ativa consumida pela carga se iguala à potência ativa gerada pela usina solar. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que, nessas circunstâncias, a carga passa a solicitar apenas potência reativa da rede elétrica ou do banco de capacitores. Essa situação pode ser verificada na figura 16 em dois momentos distintos: às 06:15 e por volta das 11:55 horas.

As Figuras 19 e 20 ilustram os comportamentos mencionados nos parágrafos anteriores e levantam um importante debate: a metodologia de cálculo do fator de potência. Observa-se que, para o mesmo ponto no tempo 22/10/2024, às 11:55:10, o equipamento apresentou três valores distintos para o fator de potência: fator de potência real por soma vetorial 0,26, fator de potência real por soma aritmética 0,28 e $\cos\varphi$ por média ponderada 0,32, na figura 26 do anexo está

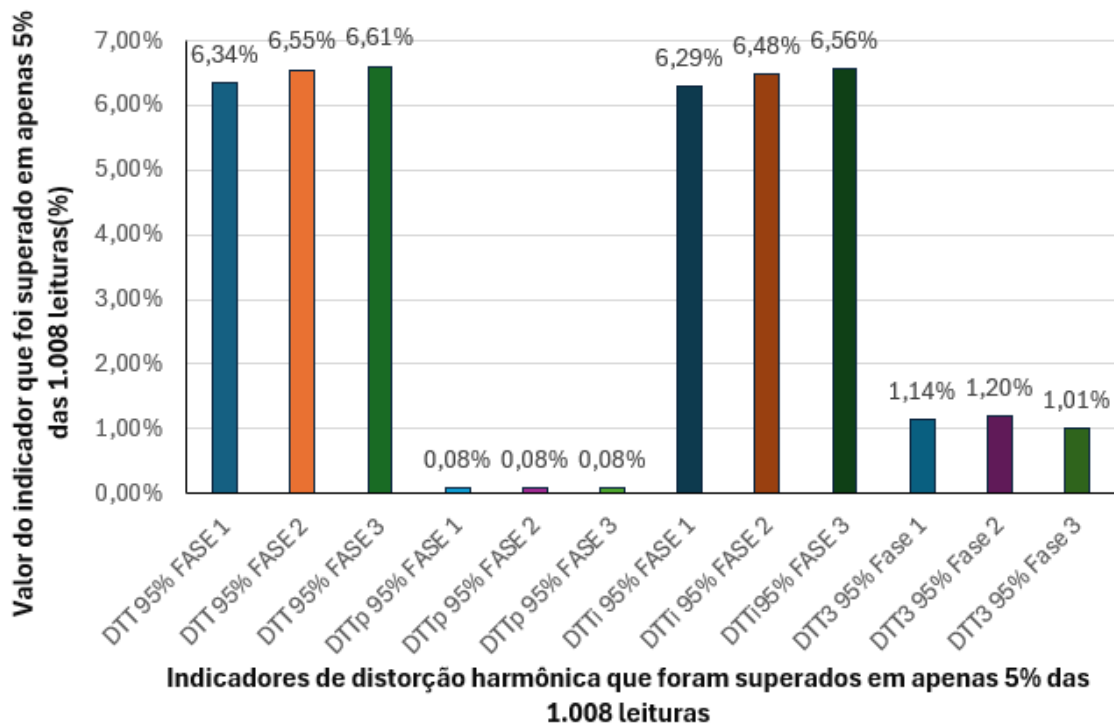
apresentada a forma de cálculo desses fatores segundo o algoritmo apresentado pelo fabricante do equipamento .

A forma genérica de cálculo do fator de potência, conforme descrita no Módulo 8 do PRODIST(ANEEL, 2024) , permite diferentes interpretações, o que pode gerar dúvidas sobre como a tarifação do consumidor deve ser aplicada.

4.5.3. DISTORÇÃO HARMÔNICA

Com base nos dados coletados, foram calculados os indicadores $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_i\%$, $DTT_3\%$, para o período de sete dias de medição. Em seguida, aplicou-se o cálculo do percentil para determinar os respectivos indicadores associados. Esses resultados estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Indicadores de distorção harmônica



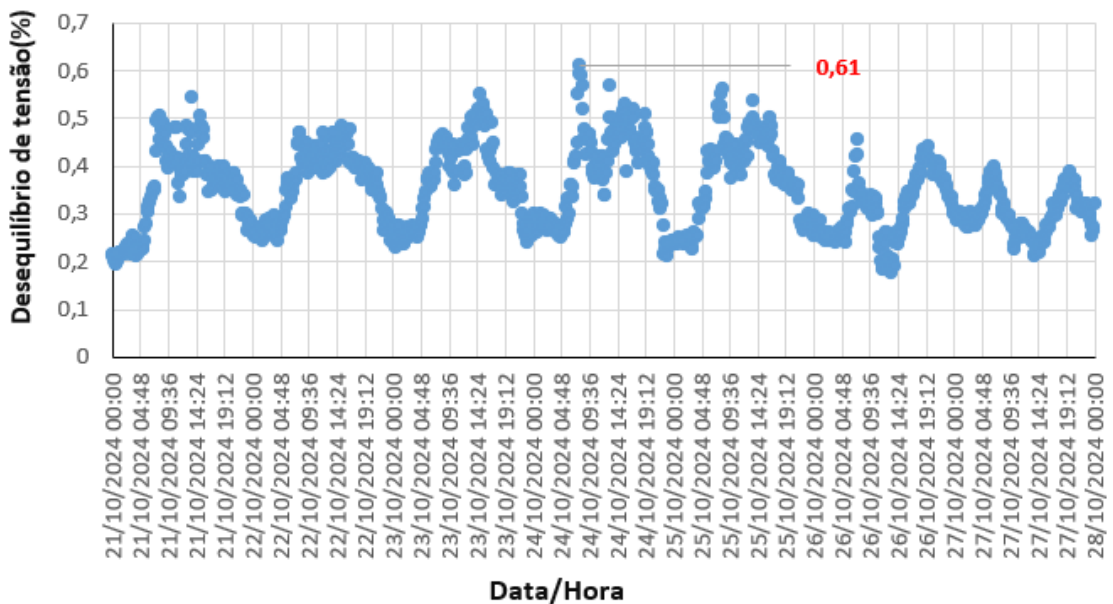
Fonte – Autoria própria

Com base na Tabela 3 e na Figura 18, e considerando que a tensão de referência do local de medição é de 380 V entre fases, verifica-se que os parâmetros encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira.

4.5.4. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O PRODIST (ANEEL, 2024) considera o fator de desequilíbrio de tensão adequado quando ele é menor que 3% para tensões de fornecimento menores ou iguais a 2,3 kV e menor que 2% para tensões entre 2,3 kV e 230 kV. Já a norma IEC 61000-2-2 (CEI/IEC, 2002) indica que o fator de desequilíbrio de tensão máximo compatível é de 2%. Na figura 22 é apresentado um gráfico contendo o valor percentual do fator durante o período de medição.

Figura 22 - Fator de desequilíbrio de tensão



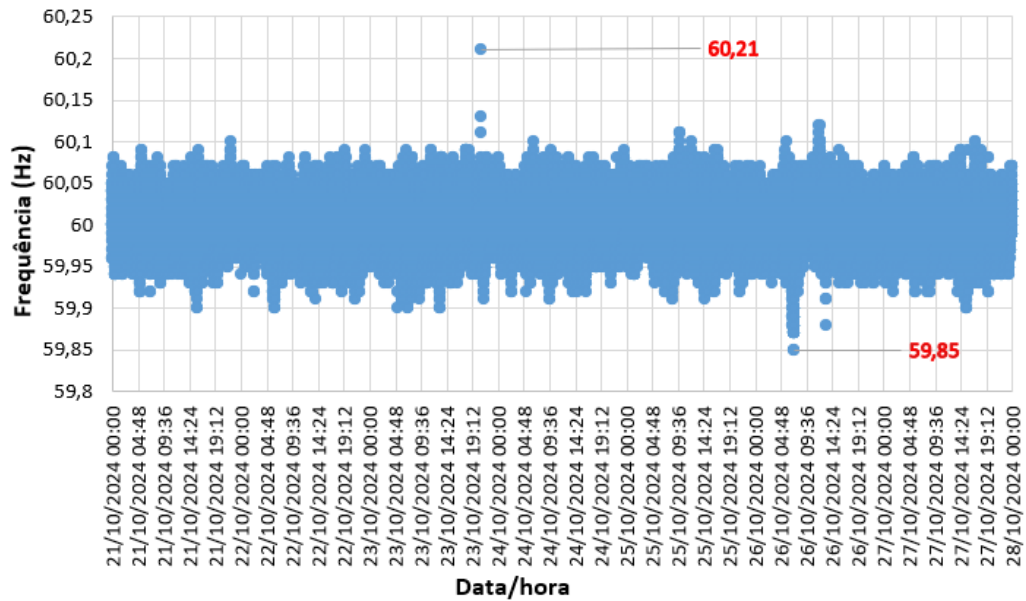
Fonte: Autoria própria

A partir dele pode-se notar que os limites de desequilíbrio de tensões das normas são respeitados, sendo o máximo valor obtido no período de medição 0,61%.

4.5.5. VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

A Figura 23 apresenta os valores das frequências na indústria durante o período de análise. Nela, observa-se que os valores não ultrapassam os limites estabelecidos pelo PRODIST(ANEEL, 2024).

Figura 23 - Frequência da rede durante o período de medição



Fonte: Autoria própria

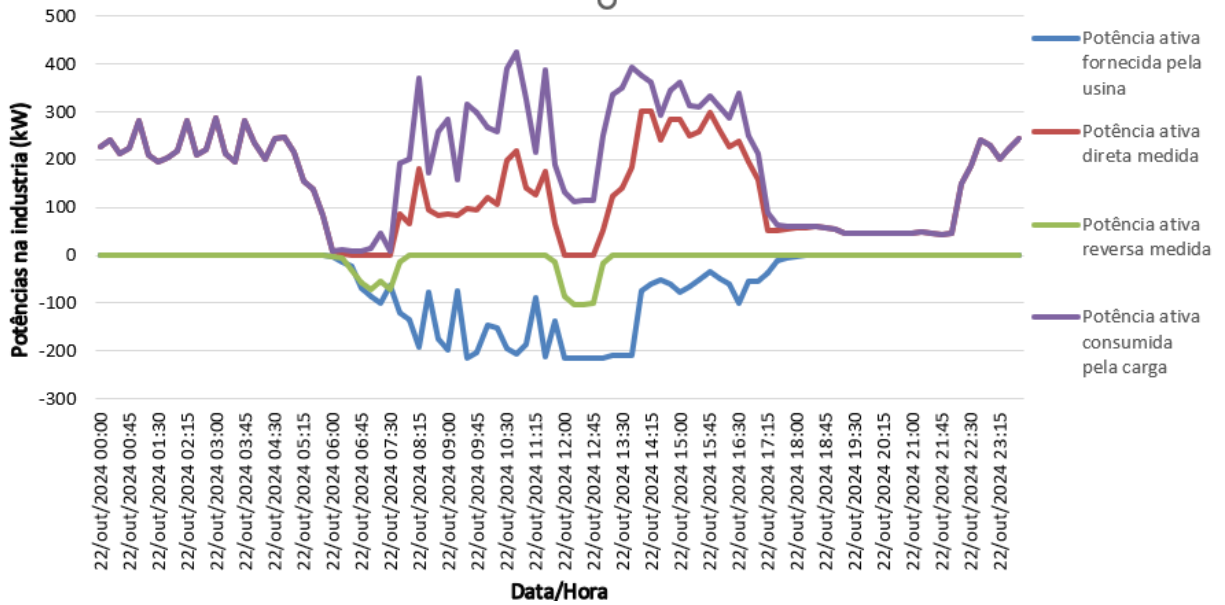
Assim, pode-se afirmar que a geração de energia solar existente na empresa, bem como os equipamentos nela instalados, não causam variações significativas na frequência da rede.

4.5.6. FLUXO REVERSO DE POTÊNCIA

A ocorrência de fluxo reverso de potência é especialmente comum em sistemas que incorporam fontes de geração distribuída, como a geração solar fotovoltaica, em períodos de baixa demanda de consumo e alta produção de energia solar, onde o excedente de energia gerado pode ser exportado para a rede elétrica. Esse fenômeno pode causar uma série de problemas na rede, como aumento de perdas técnicas, elevação da tensão nos barramentos e possíveis distorções na qualidade de energia, especialmente quando o fluxo reverso excede os níveis adequados para o sistema de distribuição.

O estudo foi realizado considerando um dia de funcionamento normal da indústria, especificamente no dia 22/10/2024, no período das 00h00 às 23h45. Os dados foram coletados pelo analisador de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e pelo sistema dos inversores. A Figura 24 apresenta o fluxo de potência ativa da instalação. Como o analisador está localizado na entrada de energia, foi possível estimar o consumo de potência ativa da carga. Essa estimativa foi realizada somando a potência ativa direta medida, que corresponde à potência injetada pela concessionária, com a potência fornecida pela usina e subtraindo a potência ativa reversa medida, que representa a potência ativa quando a geração da usina excede o consumo, essa maneira de cálculo está representada na equação 3.1.

Figura 24 - Fluxo de potência ativa durante o dia 22/10/2024

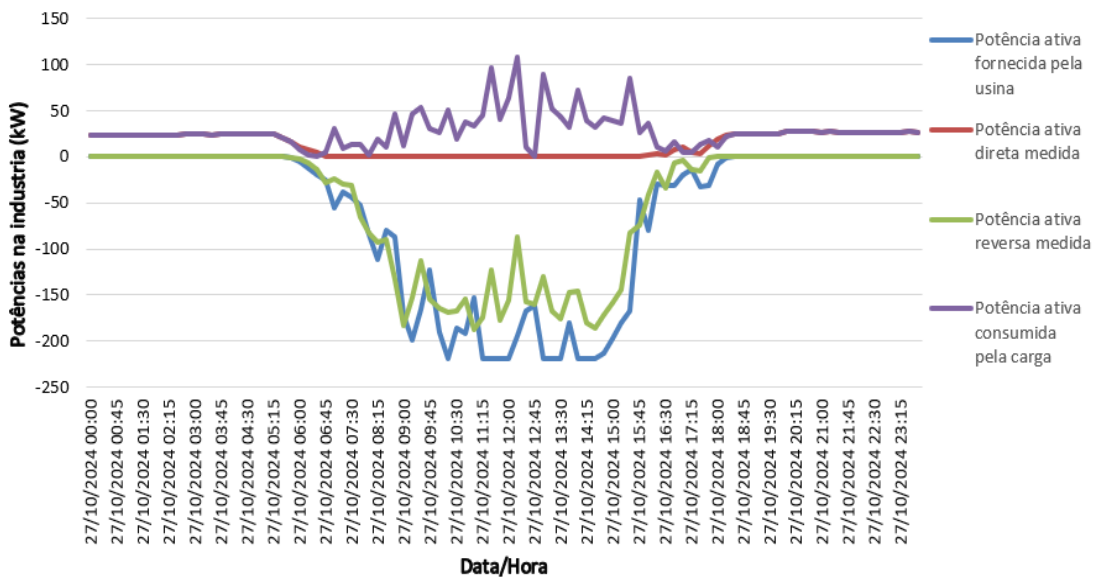


Fonte: Autoria própria

Observa-se que, nos períodos de menor consumo, como nas primeiras horas do dia e, possivelmente, durante o intervalo de almoço, ocorre o fluxo reverso de potência. Isso significa que a potência produzida pela usina excede a potência consumida pelas cargas instaladas. Durante esse intervalo, o maior valor de potência ativa reversa registrado foi de 102,38 kW, medido às 12h15.

Já a figura 25 apresenta a relação entre as energias durante um dia de final de semana, quando não há funcionamento da empresa.

Figura 25 - Fluxo de potência ativa durante dia 27/10/2024



Fonte: Autoria própria

Pode-se notar que, como há baixo consumo e uma grande geração de energia solar, o fluxo reverso de potência às 14:30 chega a 186,00 kW.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de caso realizado na empresa mostrou como a geração de energia solar na indústria afeta os parâmetros de qualidade de energia elétrica (QEE) e contribuiu para um entendimento abrangente sobre o impacto dessa geração na rede interna e suas interações com a concessionária.

Os resultados indicaram que os níveis de tensão em regime permanente estiveram dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL, 2024). ao longo do período de análise, garantindo a conformidade da instalação.

Já quanto ao fator de potência foi observado que os momentos em que os limites estabelecidos por norma são extrapolados são relativos a períodos de mudanças repentinas no consumo de potência aparente, por exemplo quando há partida ou desligamento de motores e atuação conjunta dos bancos de capacitores, além de períodos em que a potência ativa produzida pela usina solar iguala a potência ativa solicitada pela carga, nesse ponto a carga solicita somente a parcela reativa da potência aparente da rede da concessionária e do banco de capacitores.

As medições de distorção harmônica e o desequilíbrio de tensão demonstraram que os valores permanecem em conformidade com as normas vigentes, reforçando que a usina solar e os equipamentos instalados não introduziram distorções significativas que comprometessem a qualidade da energia fornecida.

O fluxo reverso de potência, registrado durante períodos de baixa demanda, evidencia um fenômeno natural em sistemas com geração distribuída. A ocorrência desses eventos deve ser considerada no dimensionamento das instalações elétricas, tanto pela unidade geradora quanto pela concessionária, uma vez que podem ocasionar fluxos de potência superiores aos suportados pelos cabos e subestações.

Dessa forma, é imprescindível manter um controle rigoroso das instalações conectadas à rede de distribuição, sendo imprudente realizar a ampliação de unidades de geração distribuída sem o devido processo de análise e aprovação pela concessionária.

No estudo realizado, constatou-se que, no dia 22/10/2024, um dia de funcionamento normal da indústria, o maior valor de potência ativa reversa registrado foi de 102,38 kW, enquanto, no final de semana, período de menor demanda de potência, esse valor alcançou 186,00 kW.

Apesar disso, ambos os valores permaneceram inferiores à potência nominal do transformador, que é de 300 kVA.

Portanto, conclui-se que a usina de geração fotovoltaica instalada desempenha um papel significativo na autossuficiência energética da empresa e contribui para a redução da demanda de energia elétrica suprida pela rede elétrica, mantendo a integridade dos parâmetros de QEE e não comprometendo a estabilidade da rede.

5. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou os parâmetros de qualidade de energia estabelecidos pelas normas vigentes, especialmente o PRODIST, e mostrou como a geração de energia solar fotovoltaica em uma instalação industrial pode impactá-los.

Durante o processo de investigação, o aprendizado sobre os parâmetros de QEE e as diretrizes normativas que os regem mostrou-se fundamental para entender os limites aceitáveis de tensão em regime permanente, fator de potência, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica e variação de frequência.

O trabalho colaborou com o conhecimento e ações relativas ao ODS 7, relacionados com energia limpa, tema deste estudo.

O estudo também aprofundou o conhecimento sobre os efeitos da geração distribuída, como o fluxo reverso de potência e suas possíveis implicações na rede elétrica, incluindo o potencial aumento de perdas técnicas e a elevação da tensão nos barramentos. Esses fenômenos destacam a necessidade de um planejamento adequado das instalações e de tecnologias que possam mitigar possíveis impactos negativos.

A análise do fator de potência em cenários de geração e consumo distintos reforçou a importância de se ter bons mecanismos de controle da potência reativa e também, na presença de cargas não lineares, filtros que reduzam a presença de componentes harmônicas, evitando assim a cobrança da concessionária quando o fator de potência fica abaixo dos limites estabelecidos. Outra observação levantada é quanto ao modo de cálculo do fator de potência, mostrando que o entendimento desses métodos é crucial para interpretação correta dos resultados e é ponto relevante a discussão do modelo de cálculo adotado no processo de tarifação.

Conclui-se que o tema estudado é de grande relevância para a indústria e para o setor de energia elétrica como um todo, pois proporciona visões sobre os efeitos da integração de geração de energia solar nos parâmetros de QEE de instalações industriais, sugerindo a

necessidade de constante atualização dos equipamentos e normas para assegurar a qualidade da energia fornecida e consumida.

Essa análise contribuiu para a formação de um profissional mais capacitado e consciente dos desafios e soluções que envolvem a geração distribuída e a manutenção da qualidade da energia elétrica.

6. REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Infográfico sobre o mercado de energia solar**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482 - Agência Nacional de Energia Elétrica**. , 2012. Disponível em: <www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 15 set. 2024

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2024.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 1000 - Agência Nacional de Energia Elétrica**. , 2021b. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Acesso em: 15 set. 2024

ANEEL. **Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist#:~:text=A%20Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Normativa%20ANEEL%20n%C2%BA%20956%2F2021%20estabelece%20os%20Procedimentos,resolu%C3%A7%C3%B5es%20anteriores%20sobre%20o%20tema.>>. Acesso em: 15 ago. 2024a.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.098 - Agência Nacional de Energia Elétrica**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20241098.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2024b.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**, Institui o Sistema de Compensação de Energia Elétrica e dispõe sobre o marco legal da microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica,. . 7 jan. 2022.

BRITO, L. M. et al. **Impactos da geração distribuída fotovoltaica na tensão elétrica de uma rede de distribuição em baixa tensão**. 2021a. Disponível em: <<http://sbqee.org.br/sbqee/>>

CEI/IEC. **61000-2-2-Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2 -Environment Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.** , 2002.

DE CASTRO, N. et al. **Impactos Sistêmicos da Micro e Minigeração Distribuída.** Rio de Janeiro: [s.n.].

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Qualidade da Energia Elétrica: conceituação e processamento digital.** 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2024. v. 1

DIAS SANTOS, J. **Análise do Sistemas Fotovoltaico Implementado no Centro de Aulas das Engenharias.** Trabalho de Conclusão de Curso—Goiânia-GO: Universidade Federal de Goiás, 2019.

DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality.** 3th. ed. [s.l.] McGraw-Hill Professional, 2002.

FUCHS, E. F.; MASOUMM, M. A. S. **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, and Power-Electronic Drives.** 3rd. ed. [s.l.: s.n.].

GINU, Y. F. **Comparativo entre a Geração Fotovoltaica em Aplicações Utilizando Inversores de String e Microinversores.** Dissertação de Mestrado—Aparecida de Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2023.

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. **IEEE 1459:Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.** 19 mar. 2010, p. 14–41.

ISSO DIGITAL. **Manual DMI P1000R Black Box.** Venâncio Aires: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.isso.digital/arquivo/2448>>. Acesso em: 1 out. 2024.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015.** 9ª Ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MELO, W. DA G. **Estudo e Aplicação da Norma IEEE 1459-2000 para Medidores Digitais de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre-RS: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2006.

MESSENGER, R. A.; VENTRE, JERRY. **Photovoltaic Systems Engineering**. [s.l.: s.n.].

MOTTA, L. et al. **Análise do fator de potência em edifício com sistema fotovoltaico**. *Revista FotoVolt*, jan. 2018. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/fotovolt/artigo_tecnico/5-Analise-do-fator-de-potencia-em-edificio-com-sistema-fotovoltico.html%7D%7D>. Acesso em: 17 nov. 2024

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

PAULILO, G. **Capítulo III - Desequilíbrios de tensão**. *Revista O Setor Elétrico. Anais...*São Paulo: 2013. Disponível em: <https://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86_fasc_qualidade_cap3.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2024

PICCOLI, D. C. et al. **Déficit de inércia síncrona: um estudo de sistemas elétricos de potência com alta penetração de energias renováveis**. Trabalho de Conclusão de Curso—Jaraguá do Sul: Instituto Federal de Santa Catarina, 2021.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: <<https://cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=481>>. Acesso em: 7 jul. 2024.

SANTOS, J. D. **Análise do sistema fotovoltaico implementado no centro de aulas das engenharias**. Trabalho de Conclusão de Curso—Goiânia-GO: Universidade Federal de Goiás, 2019.

SANTOSO, S. **Fundamentals of Electric Power Quality**. [s.l.] CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. v. 1

UFSC. **Gerador fotovoltaico mais antigo do país completa 25 anos**. Disponível em: <<https://noticias.ufsc.br/2022/09/gerador-fotovoltico-mais-antigo-do-pais-completa-25-anos/>>. Acesso em: 25 ago. 2024.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. Disponível em: <<https://www.estantevirtual.com.br/ar-livros/marcelo-gradella-villalva-energia-solar-fotovoltica->

conceitos-e-aplicacoes-sistemas-isolados-e-

4487134161?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw7ZO0BhDYARIsAFttkCibIbhKwQe5zUzSOQ3ZmBH5TyMjGx7Poi5pfHQ3KscwRrqXuoe_bz4aAuq-EALw_wcB>. Acesso em: 2 jul. 2024.

7. ANEXO

Figura 26 – Forma de cálculo das potências segundo o analisador de QEE

| Grandeza | Definição | Notas |
|---|--|---|
| Potência aparente (fase p) | $S_p = V_{pN} \times I_p$ | |
| Potência ativa (fase p) | $P_p = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} (v_{pN_k} \times I_{p_k})$ | |
| Potência fundamental (fase) | $P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_1 i_1 dt$ | A potência que seria detectada por um medidor que mede apenas a potência fundamental |
| Potência harmônica (fase) | $P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h$ | A potência que seria ignorada por um medidor que mede apenas a potência fundamental. Em motores, não é uma potência útil (não contribui com o torque de sequência positiva) |
| Potência reativa (fase) | $Q = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i \left[\int v dt \right] dt$ | |
| Sinal (\pm) da potência reativa | $SignQ(\varphi_p) = +1 \text{ se } \varphi_p \in [0^\circ - 180^\circ]$ $SignQ(\varphi_p) = -1 \text{ se } \varphi_p \in [180^\circ - 360^\circ]$ | |
| Potência ativa total | $P = P_1 + P_2 + P_3$ | |
| Potência reativa total (vetorial) | $Q_V = Q_1 + Q_2 + Q_3$ | |
| Potência aparente total (aritmética) | $S_A = S_1 + S_2 + S_3$ | |
| Potência aparente total (vetorial) | $S_V = \sqrt{P^2 + Q_V^2}$ | Sempre positivo ou zero |
| Potência reativa total (aritmética) | $Q_A = \sqrt{S_A^2 - P^2}$ | Sempre positivo ou zero |
| Grandeza | Definição | |
| Fator de potência fundamental/de deslocamento/ $\cos(\varphi)$ (fase p): | $PF_d = \cos(\varphi_p)$ | |
| Fator de potência real (fase p): | $PF_r = P_p \div S_p$ | |
| Fator de potência real total (aritmético): | $PF_A = P \div S_A$ | |
| Fator de potência total (vetorial): | $PF_V = P \div S_V$ | |

Fonte: Adaptada de (ISSO DIGITAL, 2023)