

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCOS CLOSTER MACHADO

**ANÁLISE DOS IMPACTOS NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
PRODUZIDA POR INVERSORES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA:
ESTUDO BASEADO EM MEDIÇÕES DE CAMPO.**

Porto Alegre - RS

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DOS IMPACTOS NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
PRODUZIDA POR INVERSORES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA:
ESTUDO BASEADO EM MEDIÇÕES DE CAMPO.**

Projeto de Diplomação II, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Roberto Chouhy Leborgne

Porto Alegre - RS

2024

MARCOS CLOSTER MACHADO

**ANÁLISE DOS IMPACTOS NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
PRODUZIDA POR INVERSORES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA:
ESTUDO BASEADO EM MEDIÇÕES DE CAMPO.**

Projeto de Diplomação II, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Manuel Santos Spencer Andrade UFRGS

Engenheiro Dionata Mras Lima – Prometeon Tyre Group

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne - Orientador – UFRGS

RESUMO

O crescimento da geração distribuída no Brasil tem sido marcante e reflete uma tendência crescente no setor energético nacional. A geração distribuída se diferencia da geração centralizada por sua produção de energia em instalações próximas ao ponto de consumo, em vez de grandes usinas distantes. Essa abordagem não só melhora a eficiência ao reduzir perdas no transporte de energia, mas também facilita a integração de fontes renováveis, como os painéis fotovoltaicos. Esses sistemas permitem que as unidades consumidoras (UCs) exportem o excedente de energia para a rede elétrica, proporcionando compensações financeiras ou créditos ao consumidor. Diante disso, a proposta desta obra é analisar os impactos da geração distribuída, especificamente a fotovoltaica, geradas pelo inversor fotovoltaico em duas unidades consumidoras diferentes utilizando um analisador de energia portátil. Foram analisados também os níveis de irradiância de ambos períodos de medição para agregar maiores detalhes à análise de exportação de energia. Após análise dos parâmetros das curvas de carga, comportamento do nível de tensão em regime permanente, variações de tensão de curta duração, harmônicos, flutuação de tensão (Flicker) e desequilíbrio de tensão pode-se afirmar que o fornecimento de energia atende aos padrões de qualidade estabelecidos pelas normas vigentes.

Palavras-chaves: Geração distribuída, Qualidade de energia elétrica, Inversor fotovoltaico, Analisador de energia, Distúrbios de tensão.

ABSTRACT

The growth of distributed generation in Brazil has been remarkable and reflects a growing trend in the national energy sector. Distributed generation differs from centralized generation in that it produces energy at facilities close to the point of consumption, rather than at large distant power plants. This approach not only improves efficiency by reducing energy transportation losses, but also facilitates the integration of renewable sources such as photovoltaic panels. These systems allow end users to export surplus energy to the electricity grid, providing financial compensation or credits to the consumer. In view of this, the purpose of this work is to analyze the impacts of distributed generation, specifically photovoltaic generation, on the power quality of two different end users using a portable energy analyzer. The irradiance levels of both measurement periods were also analyzed to add more detail to the energy export analysis. After analyzing the parameters of the load curves, steady state rms voltages, short-term voltage variations, harmonics disturbances, voltage fluctuations (Flicker) and voltage unbalance, it can be said that the power quality at the end users meets the standards established by current regulations.

Keywords: Distributed generation, Power quality, Photovoltaic inverter, Energy analyzer, Voltage disturbances.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Matriz elétrica do Brasil em 2022..... | 13 |
| Figura 2 – Total diário da irradiação global horizontal - média anual..... | 15 |
| Figura 3 – Modelo de sistema fotovoltaico conectado à rede..... | 16 |
| Figura 4 – Topologia básica de conversores CC-CA trifásicos..... | 20 |
| Figura 5 – Estratégia de modulação PWM de 2 níveis..... | 21 |
| Figura 6 – Formas de onda de tensão obtidas no Scilab para uma modulação SPWM de dois níveis em inversor trifásico..... | 22 |
| Figura 7 – Representação em série de Fourier de uma forma de onda distorcida..... | 25 |
| Figura 8 – Correntes harmônicas resultando em tensões harmônicas na carga..... | 27 |
| Figura 9 – Interrupção momentânea devido à falta e subsequente restabelecimento da tensão elétrica..... | 38 |
| Figura 10 – Afundamento de tensão causado pelo acionamento de um motor..... | 38 |
| Figura 11 – Elevação de tensão causada por falta fase-terra..... | 39 |
| Figura 12 – Analisador de qualidade de energia PQA-700 G5..... | 40 |
| Figura 13 – Esquema de ligação utilizado para conectar o analisador da qualidade de energia elétrica..... | 41 |
| Figura 14 – Vista aérea dos painéis fotovoltaicos instalados no mercado Super Gringa..... | 42 |
| Figura 15 – Inversor fotovoltaico instalado no mercado Super Gringa..... | 43 |
| Figura 16 – Medições realizadas no mercado Super Gringa..... | 44 |
| Figura 17 – Valores instantâneos da medição em mercado Super Gringa..... | 45 |
| Figura 18 – Vista aérea dos painéis fotovoltaicos instalados na empresa Monta Brasil..... | 45 |
| Figura 19 – Inversor fotovoltaico instalado na empresa Monta Brasil..... | 46 |
| Figura 20 – Medições realizadas na fábrica Monta Brasil..... | 47 |
| Figura 21 – Valores instantâneos da medição na empresa Monta Brasil..... | 48 |
| Figura 22 – Níveis de irradiância no período de medição – Super Gringa..... | 49 |
| Figura 23 – Níveis de irradiância no período de medição – Monta Brasil..... | 49 |
| Figura 24 – Curvas de potência ativa por fase – Super Gringa..... | 50 |
| Figura 25 – Curvas de potência ativa total– Super Gringa..... | 51 |
| Figura 26 – Nível de tensão de fase durante as medições – Super Gringa..... | 53 |
| Figura 27 – Histograma das tensões durante o período de medição..... | 53 |
| Figura 28 – Curva ITIC – Super Gringa..... | 56 |
| Figura 29 – Distorção harmônica total de tensão por registro – Super Gringa..... | 57 |
| Figura 30 – Comportamento da Pst fase B – Super Gringa..... | 59 |
| Figura 31 – Tendência de desequilíbrio de tensão – Super Gringa..... | 60 |
| Figura 32 – Distribuição acumulada FD95% – Super Gringa..... | 60 |
| Figura 33 – Curvas de potência ativa por fase – Monta Brasil..... | 61 |
| Figura 34 – Curvas de potência ativa total – Monta Brasil..... | 62 |
| Figura 35 – Nível de tensão de fase durante as medições – Monta Brasil..... | 64 |
| Figura 36 – Comparação do nível de tensão e potência ativa da fase A dia 30/05 – Monta Brasil..... | 64 |
| Figura 37 – Histograma das tensões durante período de medição..... | 65 |
| Figura 38 – Curva ITIC – Monta Brasil..... | 67 |
| Figura 39 – Distorção harmônica total de tensão por registro – Monta Brasil..... | 69 |
| Figura 40 – Comportamento Pst das 3 fases – Monta Brasil..... | 70 |
| Figura 41 – Tendência de desequilíbrio de tensão – Monta Brasil..... | 71 |
| Figura 42 – Distribuição acumulada FD95% – Monta Brasil..... | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Categorias e características típicas dos fenômenos eletromagnéticos em sistemas de potência. | 24 |
| Tabela 2 – Sequência de fase por ordem harmônica. | 26 |
| Tabela 3 – Terminologia para cálculo de harmônicos. | 29 |
| Tabela 4 – Limites individuais de distorção harmônica de corrente na saída do sistema fotovoltaico. | 30 |
| Tabela 5 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental). | 31 |
| Tabela 6 – Limites de distorção de corrente (DTD) em relação à corrente fundamental. | 31 |
| Tabela 7 – Terminologia para cálculo do desequilíbrio de tensão. | 32 |
| Tabela 8 – Limites para desequilíbrio de tensão. | 32 |
| Tabela 9 – Terminologia Para cálculo de efeito Flicker. | 34 |
| Tabela 10 – Limites para flutuação de tensão. | 34 |
| Tabela 11 – Limites de tensão de regime permanente tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220). | 36 |
| Tabela 12 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração. | 37 |
| Tabela 13 – Especificações inversor fotovoltaico RENO-30K. | 43 |
| Tabela 14 – Especificações inversor fotovoltaico RENO-30K-NG-HC. | 46 |
| Tabela 15 – Indicadores de nível de tensão em regime permanente – Super Gringa. | 51 |
| Tabela 16 – Valores mínimos e máximos de tensão fase-neutro em regime permanente – Super Gringa. | 52 |
| Tabela 17 – Valores mínimos e máximos de tensão de linha em regime permanente – Super Gringa. | 52 |
| Tabela 18 – Variações de tensão de curta duração – Super Gringa. | 54 |
| Tabela 19 – Classificação dos distúrbios – Super Gringa. | 55 |
| Tabela 20 – Indicadores de distorção harmônica – Super Gringa. | 56 |
| Tabela 21 – Valores máximos e médios de distorção harmônica – Super Gringa. | 57 |
| Tabela 22 – Indicadores de flutuação de tensão – Super Gringa. | 58 |
| Tabela 23 – Indicadores de desequilíbrio de tensão – Super Gringa. | 59 |
| Tabela 24 – Indicadores de nível de tensão em regime permanente – Monta Brasil. | 62 |
| Tabela 25 – Valores mínimos e máximos de tensão fase-neutro em regime permanente – Monta Brasil. | 63 |
| Tabela 26 – Valores mínimos e máximos de tensão de linha em regime permanente – Monta Brasil. | 63 |
| Tabela 27 – Variações de tensão de curta duração – Monta Brasil. | 65 |
| Tabela 28 – Classificação dos distúrbios – Monta Brasil. | 66 |
| Tabela 29 – Indicadores de distorção harmônica – Monta Brasil. | 67 |
| Tabela 30 – Indicadores totais de distorção harmônica – Monta Brasil. | 68 |
| Tabela 31 – Indicadores de flutuação de tensão – Monta Brasil. | 69 |
| Tabela 32 – Indicadores de desequilíbrio de tensão – Monta Brasil. | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|--|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CA | Corrente alternada |
| CC | Corrente contínua |
| CEC | California Energy Commission |
| DHT | Distorção Harmónica Total |
| DRC | Duração relativa de transgressão de tensão crítica |
| DRP | Duração relativa de transgressão de tensão precária |
| DTD | Distorção total de demanda |
| EMC | Electromagnetic compatibility |
| EPE | Empresa de Pesquisas Elétricas |
| FV | Fotovoltaico |
| GD | Geração Distribuída |
| IEC | Consul International Electrotechnical Commission |
| IEEE | Institut of Electrical and Electronics Engineers |
| IGBTs | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| MOSFET | Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| MPP | Maximum Power Point |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| PCC | Ponto comum de conexão |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| RGE | Rio Grande Energia |
| SFCR | Sistemas fotovoltaicos conectados à rede |
| SPWM | Sinusoidal Pulse Width Modulation |
| TC | Transformador de corrente |
| TDD | Total demand distortion |
| UC | Unidade consumidora |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------------|--|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1. | MOTIVAÇÃO..... | 10 |
| 1.2. | OBJETIVOS..... | 11 |
| 2. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 12 |
| 2.1. | SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA..... | 12 |
| 2.1.1. | Principais fontes de energia na geração distribuída no Brasil..... | 13 |
| 2.1.2. | Geração distribuída com sistemas fotovoltaicos..... | 14 |
| 2.1.3. | Vantagens da geração distribuída..... | 17 |
| 2.1.4. | Desvantagens da geração distribuída..... | 18 |
| 2.2. | CONVERSORES CC-CA..... | 19 |
| 2.2.1. | Características e princípio de funcionamento dos inversores trifásicos fotovoltaicos..... | 19 |
| 2.2.2. | Modulação por Largura de Pulso Senoidal (SPWM)..... | 20 |
| 2.2.3. | Inversores grid-tie..... | 22 |
| 2.3. | DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA..... | 23 |
| 2.3.1. | Distorções harmônicas..... | 25 |
| 2.3.1.1. | Sequenciamento de fase..... | 25 |
| 2.3.1.2. | Geração de distorção harmônica..... | 26 |
| 2.3.1.3. | Efeitos das distorções harmônicas de corrente..... | 28 |
| 2.3.1.4. | Indicadores de distorção harmônica..... | 28 |
| 2.3.2. | Desequilíbrios de tensão..... | 31 |
| 2.3.3. | Flutuações de tensão..... | 32 |
| 2.3.4. | Tensão em regime permanente..... | 34 |
| 2.3.5. | Variações de tensão de curta duração..... | 36 |
| 3. | ESTUDO DE CASO..... | 39 |

| | | |
|--------|--|-----------|
| 3.1. | METODOLOGIA ADOTADA PARA MEDIÇÃO DE ENERGIA..... | 39 |
| 3.2. | EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO | 40 |
| 3.3. | SOFTWARE DE MEDIÇÃO | 41 |
| 3.4. | MEDIÇÕES MERCADO SUPER GRINGA | 42 |
| 3.5. | MEDIÇÕES MONTA BRASIL | 45 |
| 4. | RESULTADOS | 48 |
| 4.1. | ANÁLISE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA MERCADO SUPER GRINGA | 50 |
| 4.1.1. | Análise das curvas de carga | 50 |
| 4.1.2. | Análise do comportamento do nível de tensão em regime permanente..... | 51 |
| 4.1.3. | Variações de tensão de curta duração..... | 54 |
| 4.1.4. | Análise de harmônicos..... | 56 |
| 4.1.5. | Análise de flutuação de tensão (Flicker) | 58 |
| 4.1.6. | Análise do desequilíbrio de tensão | 59 |
| 4.2. | ANÁLISE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA MONTA BRASIL | 60 |
| 4.2.1. | Análise das curvas de carga | 60 |
| 4.2.2. | Análise do comportamento do nível de tensão em regime permanente..... | 62 |
| 4.2.3. | Variações de tensão de curta duração..... | 65 |
| 4.2.4. | Análise de harmônicos..... | 67 |
| 4.2.5. | Análise de flutuação de tensão (Flicker) | 69 |
| 4.2.6. | Análise do desequilíbrio de tensão | 70 |
| 5. | CONCLUSÃO | 72 |
| 6. | SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS..... | 74 |
| 7. | ANEXO A | 75 |
| 8. | REFERÊNCIAS..... | 76 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, a crescente demanda por energia elétrica e a busca por fontes renováveis têm impulsionado a implementação de sistemas de geração distribuída, especialmente os que utilizam painéis fotovoltaicos em unidades consumidoras. Esses sistemas são atraentes por sua capacidade de gerar energia limpa e sustentável, contribuindo significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a tecnologia fotovoltaica tem se tornado cada vez mais acessível e eficiente, permitindo sua integração em uma ampla variedade de aplicações, desde residências até grandes instalações industriais. Nesse contexto, a geração distribuída não apenas complementa a produção de energia convencional, mas também oferece maior autonomia aos consumidores.

O uso generalizado ou específico das unidades de geração distribuída (GD) através das fontes renováveis de energia cria novos problemas para as concessionárias que operam o sistema elétrico devido ao planejamento, controle e gerenciamento do sistema de distribuição, tais como a perda de coordenação em sistemas de proteção devido às sobrecorrentes, religamentos instantâneos e operações em ilhamento. Estas questões envolvem a qualidade da energia elétrica no ponto de conexão da planta, além dos problemas associados com a inserção inadequada dessas novas fontes de energia no sistema elétrico de potência (CAMPOCCIA, COCCHIARA, et al., 2013; CATALIOTTI, COCCHIARA, et al., 2008; CHAITUSANEY e YOKOYAMA, 2005; DUGAN e MCDERMOTT, 2002).

Dentre os diversos aspectos da qualidade da energia elétrica que podem ser afetados pela inserção de sistemas fotovoltaicos está a distorção harmônica gerada pelos inversores, por exemplo. Com o crescimento do uso de equipamentos eletrônicos comutados, a corrente consumida está apresentando níveis cada vez maiores de distorção harmônica. Portanto, este aspecto, tornou-se significativo, podendo causar redução da vida útil dos transformadores e até provocar a explosão de bancos de capacitores.

A intermitência na geração de energia solar fotovoltaica, influenciada por variáveis climáticas, pode introduzir flutuações na tensão da rede, complicando ainda mais a gestão da qualidade da energia elétrica. Além disso, fenômenos como desequilíbrio de tensão, nível de tensão em regime permanente e variações de tensão de curta duração serão abordados no presente trabalho e quantificados por meio de medições de campo.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar a análise da qualidade de energia elétrica de unidades consumidoras com geração distribuída. Para isso será utilizado um analisador de energia classe A no ponto de conexão de ambas unidades consumidoras. O aparelho permanece realizando medições durante 7 dias com agregações de 10 minutos, totalizando 1008 registros válidos para análise de qualidade de energia, como exige o Módulo 8 do PRODIST.

Após completados os 1008 registros válidos serão feitas as análises a fim de ver o grau de conformidade com o Módulo 8 do PRODIST, que define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição.

Especificamente serão feitos os seguintes estudos:

- Análise das curvas de carga.
- Análise do comportamento do nível de tensão em regime permanente.
- Análise das variações de tensão de curta duração.
- Análise de distorção harmônica.
- Análise de flutuação de tensão (Flicker).
- Análise do desequilíbrio de tensão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo do estudo abordará três tópicos fundamentais para a compreensão teórica do trabalho em questão: Geração distribuída, Conversores CC-CA e Distúrbios da qualidade de energia elétrica.

2.1. SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Denomina-se GD como um tipo de geração elétrica que se diferencia da realizada pela geração centralizada por ocorrer em locais em que não seria instalada uma usina geradora convencional, contribuindo assim para aumentar a distribuição geográfica da geração de energia elétrica em determinada região (COGEN, 2013).

A geração distribuída (GD) é a geração e armazenamento de energia elétrica em pequena escala, mais próximo ao centro de carga, com opção de interagir, ou seja, comprar ou vender com a rede, e, em alguns casos, considerando a máxima eficiência energética (ALMEIDA, 2021)

A Geração Distribuída não apenas desempenha um papel crucial na promoção da sustentabilidade e na produção de energia ambientalmente amigável, mas também tem um impacto significativo no sistema de transmissão e distribuição de energia. Isso ocorre porque ela modifica fundamentalmente a estrutura do sistema existente ao diversificar a matriz elétrica do país, trazendo consigo uma série de mudanças na concepção e operação do sistema elétrico.

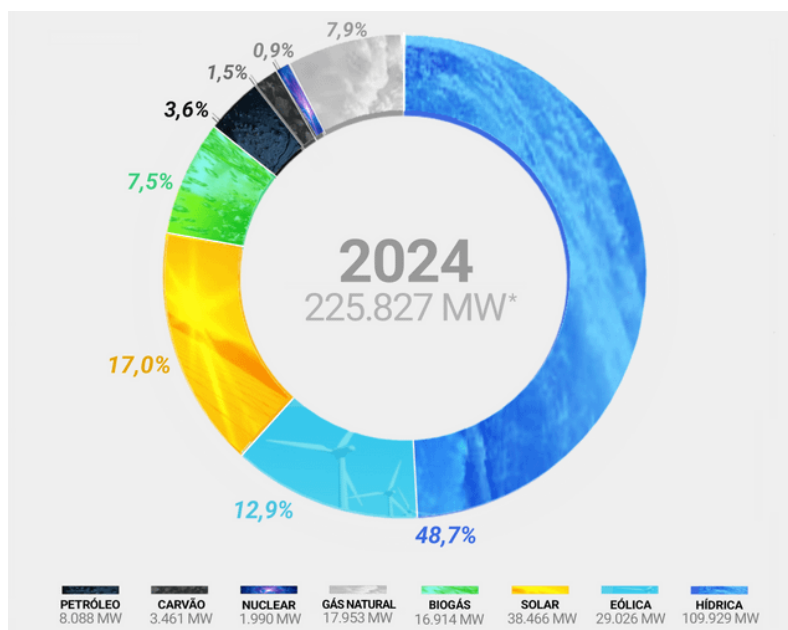
Outros fatores, além dos ambientais, impulsionam o crescimento no uso da GD, cita-se os principais listados pela Agência Internacional de Energia:

- Aumento da demanda dos clientes por energia elétrica confiável.
- Preocupações com relação à mudança climática.
- Restrições com relação à construção de novas linhas de transmissão.
- Crescente desenvolvimento das tecnologias para geração distribuída.
- Liberalização do mercado da eletricidade.

A implementação da geração distribuída desempenha um papel crucial ao descentralizar a produção de energia elétrica, contrastando com a atual dependência do Brasil em relação às usinas hidrelétricas. Segundo dados da Empresa de Pesquisas Elétricas (EPE), aproximadamente 61,9% da energia produzida no país provém dessa fonte (Figura 1). Essa concentração em uma única fonte de energia pode representar vulnerabilidades diante de

eventos climáticos extremos e variações sazonais do clima. Portanto, ao diversificar a matriz energética por meio da geração distribuída, o Brasil não apenas reduz sua exposição a tais riscos, mas também promove uma transição para um sistema mais resiliente, sustentável e eficiente.

Figura 1 – Matriz elétrica do Brasil em 2022.



Fonte: ANEEL, 2024 .

2.1.1. Principais fontes de energia na geração distribuída no Brasil

No Brasil, as principais fontes de geração distribuída são a energia solar fotovoltaica, a energia eólica e a energia provida por biomassa. A Figura 1 mostra que cerca de 20,9% da matriz energética brasileira é dada por essas fontes de energia. Essas fontes desempenham um papel significativo na diversificação da matriz energética do país, contribuindo para reduzir a dependência de fontes não renováveis, como o petróleo e o carvão mineral, e para mitigar os impactos ambientais associados à geração de eletricidade.

A energia solar fotovoltaica é uma das formas mais populares de geração distribuída no Brasil. O país possui um enorme potencial solar, de acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a irradiação solar global horizontal média do Brasil é em torno de 5.153 Wh/m², o que torna essa tecnologia altamente viável em praticamente todo o território nacional. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2024, o Brasil conta com mais de 40 GW de potência instalada em sistemas fotovoltaicos de micro e minigeração distribuída, com previsão de crescimento contínuo nos próximos anos. O investimento em energia solar

fotovoltaica tem se mostrado cada vez mais atrativo devido à redução de custos dos equipamentos e à implementação de políticas de incentivo, como a isenção de impostos e linhas de financiamento específicas.

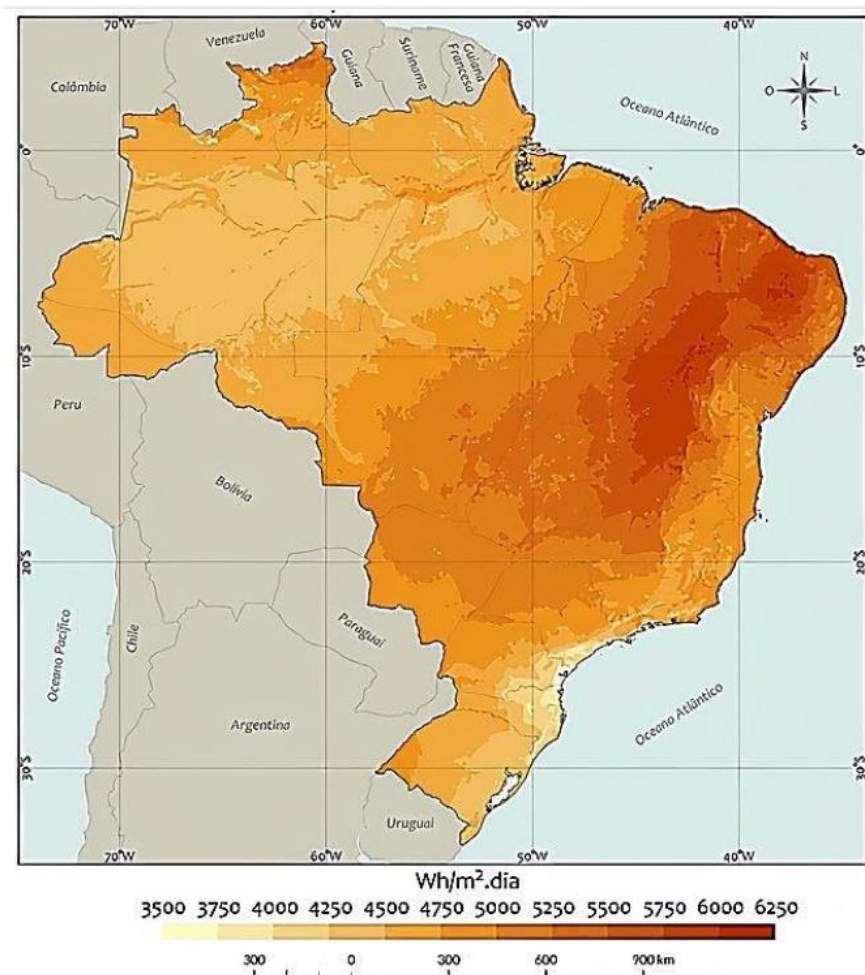
A energia eólica é outra fonte relevante de geração distribuída no Brasil. O país possui um grande potencial eólico, especialmente nas regiões litorâneas e em algumas áreas do interior, como o Nordeste. Em 2023, o Brasil contava com mais de 25 GW de capacidade instalada em parques eólicos, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica. Apesar da maior parte da energia eólica ser gerada em parques de grande porte conectados ao sistema elétrico nacional, há também um crescente interesse na geração distribuída com pequenos aerogeradores, especialmente em propriedades rurais e comunidades isoladas.

A biomassa é outra fonte de energia renovável obtida a partir de materiais orgânicos, como resíduos agrícolas, florestais e urbanos. No Brasil, a biomassa é utilizada na geração distribuída principalmente em usinas de cogeração movidas a bagaço de cana-de-açúcar e outras biomassas. Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (PACHECO, 2012), em 2023, o Brasil possuía mais de 20 GW de capacidade instalada em usinas de cogeração a partir do bagaço de cana, fornecendo energia elétrica tanto para consumo interno das usinas quanto para o sistema elétrico nacional. A biomassa é uma importante contribuição para a matriz energética do país, especialmente na região Centro-Sul, onde há uma grande produção de cana-de-açúcar. Além disso, ela oferece a vantagem de ser uma fonte de energia firme e previsível, que pode ser utilizada de forma complementar à geração intermitente de energia solar e eólica.

2.1.2. Geração distribuída com sistemas fotovoltaicos

A energia fotovoltaica é uma forma de geração de eletricidade a partir da conversão direta da luz solar em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas, geralmente feitas de silício. Essas células, quando expostas à luz solar, geram uma corrente elétrica que pode ser utilizada para alimentar sistemas elétricos. No Brasil, a capacidade para geração de energia fotovoltaica é bastante significativa, dada a extensão territorial do país e o elevado nível de radiação solar em grande parte do território nacional. Pode ser observada na Figura 2, a irradiação global horizontal média anual no território brasileiro. A expectativa é de que a capacidade de geração continue a crescer nos próximos anos, impulsionada pela redução dos custos dos equipamentos e pelo aumento da conscientização sobre os benefícios da energia solar.

Figura 2 – Total diário da irradiação global horizontal - média anual.



Fonte: (INPE, 2018).

Os painéis solares podem ser instalados em uma variedade de locais, desde telhados de residências, edifícios comerciais e industriais até áreas rurais e urbanas. Eles podem ser fixados em estruturas específicas, como suportes metálicos ou sistemas de rastreamento solar, para otimizar a captura da luz solar ao longo do dia. Além disso, há também a possibilidade de instalação de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de água, aproveitando áreas que não são utilizadas para outras finalidades.

Sistemas fotovoltaicos podem ser Off-Grid, Híbridos, Flutuantes e *on grid*. Para esse trabalho será estudado o impacto de inversores conectados à rede, logo, apenas será abordado sistemas fotovoltaicos *on grid*, ou conectados à rede (SFCR).

Em primeiro lugar, os módulos fotovoltaicos convertem a luz solar em energia elétrica em corrente contínua (CC) por meio de células fotovoltaicas, utilizando o efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico é a criação de uma corrente elétrica em um material semicondutor quando exposto a determinada frequência de radiação luminosa, como no painel solar exposto ao sol. Em seguida, o inversor solar converte a corrente CC em corrente alternada (CA), tornando-a compatível com a rede elétrica local. Com isso, a unidade consumidora (UC) poderá consumir a energia gerada ou exportar energia para rede. Será abordado o funcionamento do inversor fotovoltaico (*grid-tie*) na seção 2.2.3. Após isso, a energia elétrica gerada é direcionada para o painel de distribuição da residência ou da concessionária de energia elétrica, onde pode ser consumida imediatamente ou transferida para a rede elétrica, dependendo das necessidades de energia do momento. É necessário que haja um medidor bidirecional no ponto de conexão para registrar tanto a energia consumida da rede quanto a energia excedente enviada de volta para a rede. Na Figura 3 podemos observar uma representação de um sistema fotovoltaico *on-grid*.

Figura 3 – Modelo de sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: (CSR SOLAR ENERGIA, 2017).

Quando a relação entre a geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico e o consumo da unidade é maior do que 1, significa que a unidade está gerando mais energia elétrica do que está consumindo. Nesse caso um analisador de energia conectado ao medidor mostraria uma potência negativa, o excesso de energia elétrica é transferido para a rede elétrica, gerando créditos de energia para o proprietário do sistema. Esses créditos podem ser utilizados para compensar o consumo da rede durante períodos em que a produção solar é insuficiente, como à noite ou em dias nublados. Esse processo é conhecido como compensação de energia líquida (*Net Metering*) e é uma prática comum em muitas regiões, incentivando ainda mais a adoção

de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Segundo RN 687, o excedente de energia é a diferença positiva entre a energia injetada e a consumida, exceto para o caso de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras, em que o excedente é igual à energia injetada.

2.1.3. Vantagens da geração distribuída

O crescimento da geração distribuída possibilita um planejamento estratégico mais preciso em relação às quais fontes geradoras devem-se utilizar a cada momento do ano. Com isso, a dependência de usinas hidrelétricas, e até mesmo termelétricas, se torna menor, fazendo com que haja o restabelecimento nos níveis dos reservatórios em épocas de seca e diminuição na emissão de gases poluentes no caso de termelétricas.

Além dos benefícios citados, a Nota Técnica nº 0043/2010–SRD/ANEEL de 08/09/2010 trata de outros benefícios ao sistema elétrico com a presença de geradores próximos às cargas, sendo:

Menor tempo de implantação: A geração distribuída se destaca por seu menor tempo de implantação em comparação com grandes projetos de geração centralizada. Isso ocorre devido à sua modularidade e escalabilidade. Sistemas de geração distribuída, como painéis solares fotovoltaicos e pequenas turbinas eólicas, podem ser instalados em prazos relativamente curtos, tendo em média um prazo de 60 dias até a homologação por parte da concessionária caso haja necessidade de obras na rede elétrica. (ANEEL, 2016).

Menor impacto ambiental: Uma das vantagens mais proeminentes da geração distribuída é seu menor impacto ambiental em comparação com as fontes tradicionais de energia, como o carvão e o petróleo. Sistemas de geração distribuída baseados em fontes renováveis, como energia solar e eólica, produzem eletricidade sem emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a redução da pegada de carbono. Além disso, a diversificação da matriz energética promovida pela geração distribuída é essencial para garantir a segurança energética e reduzir a dependência de fontes de energia fóssil.

Estabilização do nível de tensão da rede no período de carga pesada: Durante picos de demanda, como em dias quentes de verão, os sistemas de geração distribuída podem fornecer energia adicional à rede, reduzindo a pressão sobre as fontes de geração centralizada. Essa contribuição pode ajudar a evitar quedas de tensão e sobrecargas na rede elétrica, garantindo um fornecimento estável de eletricidade para os consumidores.

Redução nas perdas elétricas devido ao processo de transmissão: Um dos benefícios mais significativos da geração distribuída é a redução nas perdas elétricas associadas ao processo de transmissão de energia. Como a energia elétrica é produzida mais próxima aos pontos de consumo, há menos necessidade de longas linhas de transmissão, nas quais ocorrem perdas devido à resistência dos cabos e outros elementos, melhorando a eficiência geral do sistema. Em um país vasto como o Brasil, com grandes distâncias entre as fontes de geração e os centros de consumo, essa redução nas perdas elétricas pode ter um impacto significativo na eficiência energética e na economia de recursos.

2.1.4. Desvantagens da geração distribuída

A adoção crescente da geração distribuída (GD) de energia apresenta uma série de desafios técnicos e operacionais para o sistema elétrico. Neste contexto, é crucial examinar as desvantagens associadas a essa forma de geração de energia e suas consequências detalhadas.

Uma das principais desvantagens da GD é a alteração do fluxo de potência, que pode resultar em mudanças significativas na configuração do sistema elétrico. Isso pode provocar sobretensões e fluxos de potência bidirecionais em locais onde a proteção não está adequadamente dimensionada, aumentando o risco de falhas no sistema. Por exemplo, em sistemas de distribuição convencionais, projetados para fluxos de potência unidirecionais, a inserção de geração distribuída pode exigir atualizações substanciais para garantir a estabilidade e a segurança operacional.

Além disso, a intermitência das fontes eólicas e fotovoltaicas, devido aos efeitos meteorológicos e à sua difícil previsibilidade, podem ser problemáticos em áreas com pouca radiação solar. A variação na geração de energia dessas fontes pode afetar a qualidade da energia elétrica fornecida ao consumidor final, causando flutuações de tensão e injeção de componentes harmônicos na rede elétrica, por exemplo. Isso pode comprometer a operação de equipamentos sensíveis e resultar em interrupções no fornecimento de energia, afetando a confiabilidade do sistema elétrico.

Com a disseminação em larga escala desse tipo de tecnologia, o aumento do uso de GD também requer modificações nos procedimentos de planejamento e operação do sistema elétrico. Os modelos convencionais de planejamento devem ser ajustados para considerar a variabilidade das fontes de geração distribuída e garantir a integração eficiente desses recursos na rede. Isso inclui a implementação de técnicas de controle e coordenação para gerenciar a operação em tempo real e garantir o equilíbrio entre oferta e demanda de energia.

Além disso, a diminuição da arrecadação financeira pelas grandes usinas de geração convencional devido à proliferação da GD pode ter implicações significativas no custo da energia para o consumidor final. Com a redução da demanda por energia proveniente de fontes tradicionais, as concessionárias de energia podem ser forçadas a aumentar as tarifas para compensar a perda de receita, resultando em custos mais altos para os consumidores finais.

2.2. CONVERSORES CC-CA

Os conversores CC-CA também chamados de “inversores de frequência” tem como principal função converter uma fonte de tensão contínua aplicada à sua entrada em tensão alternada na saída do conversor (PACHECO, 2012). Seu funcionamento se dá por meio de dispositivos semicondutores que chaveiam a entrada CC, o inversor produz uma saída CA de frequência determinada.

A forma de onda da tensão de saída de um inversor ideal deve ser senoidal. Na prática, entretanto, ela não é senoidal e contém determinadas harmônicas. Para aplicações de baixa e média potência, tensões com onda quadrada ou quase quadrada podem ser aceitáveis, mas para aplicações de alta potência são necessárias formas de onda senoidais com baixa distorção. Com a disponibilidade de dispositivos semicondutores de potência de alta velocidade, os conteúdos harmônicos da tensão de saída podem ser significativamente minimizados ou reduzidos por meio de técnicas de chaveamento (RASHID, 2018). Os inversores têm uma ampla gama de aplicações em diversos setores industriais, como acionadores de motores de corrente alternada com controle de velocidade variável, sistemas de energia renovável, transporte, aquecimento por indução e fornecimento de energia auxiliar e ininterrupta.

Para o presente trabalho será estudado o inversor trifásico, pois as medições em campo foram feitas apenas em redes onde há inversores de frequência trifásicos.

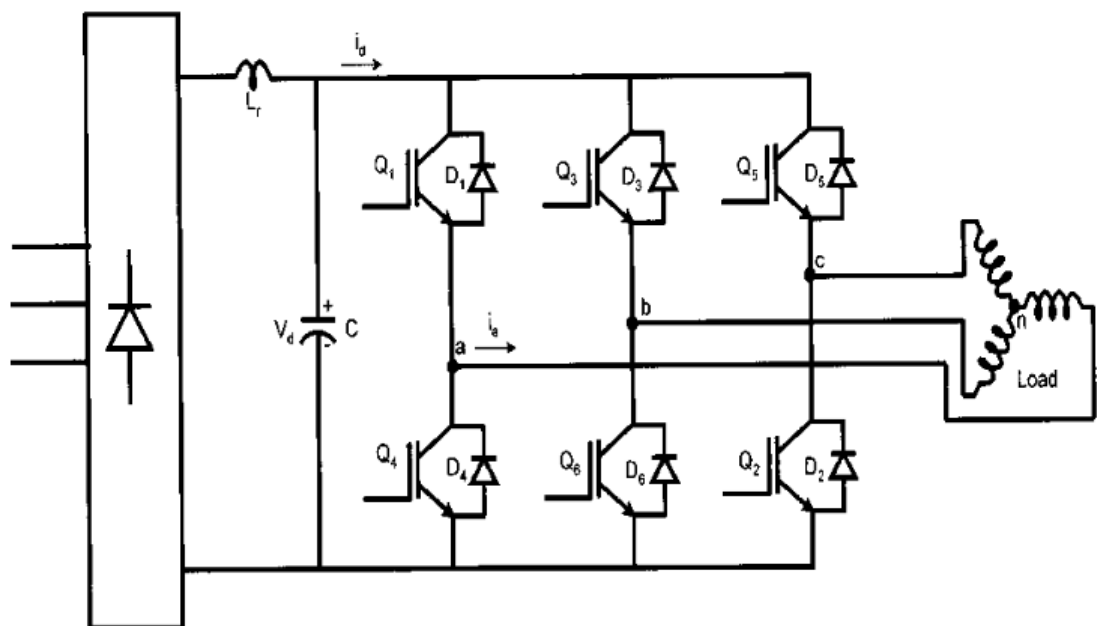
2.2.1. Características e princípio de funcionamento dos inversores trifásicos fotovoltaicos

Inversores trifásicos são usados em controle de máquinas elétricas industriais e comerciais, bem como aplicações de energia renovável, para converter a energia gerada em corrente contínua pelos painéis solares ou turbinas em corrente alternada utilizável pela maioria dos equipamentos elétricos. Os inversores trifásicos têm três conjuntos de componentes de potência e controle, um para cada fase da corrente alternada. Isso permite que a energia seja

distribuída de forma mais eficiente e equilibrada em sistemas de energia trifásicos, encontrados comumente em aplicações industriais e comerciais.

O circuito de um inversor trifásico consiste em três meias-pontes, que são mutuamente deslocadas de fase por um ângulo de $2\pi/3$ para gerar as ondas de tensão trifásicas equilibradas. A Figura 4 evidencia uma topologia comum para inversores CC-CA trifásicos, hoje em dia os semicondutores mais utilizados para compor o circuito são os IGBTs.

Figura 4 – Topologia básica de conversores CC-CA trifásicos.



Fonte: BOSE, K. 2015.

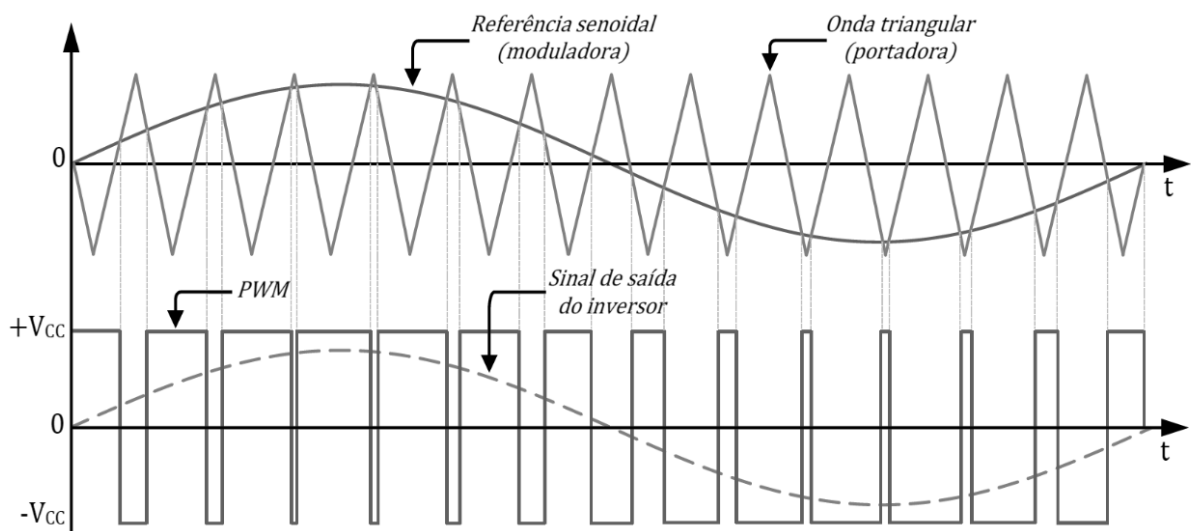
O controle dos dispositivos semicondutores pode ser executado por meio da aplicação de técnicas de modulação, cuja eficácia está diretamente ligada à qualidade do sinal de saída desejada no inversor FV, bem como às exigências de filtragem necessárias para garantir a conformidade do SFCR com as normas e recomendações aplicáveis.

2.2.2. Modulação por Largura de Pulso Senoidal (SPWM)

Dentre os vários tipos de estratégias de modulação existentes, a estratégia de modulação SPWM é a uma das mais utilizadas, normalmente no estágio de saída dos inversores. Esse tipo de modulação exige a presença de filtros de saída formados por indutores e capacitores, com o intuito de reduzir o conteúdo harmônico da corrente injetada na rede elétrica (MARTINS e BARBI, 2005). Esse tipo de modulação consiste em realizar uma comparação entre dois sinais, um senoidal, denominado modulante, e um triangular, denominado de portador. Essa comparação é representada pela Figura 5.

O sinal modulante, também conhecido como sinal de referência, estabelece a frequência fundamental do sinal de saída do inversor fotovoltaico (FV). Ele modula o ciclo de trabalho, influenciando diretamente a amplitude do sinal de saída. Por outro lado, a onda portadora triangular indica a frequência de chaveamento do inversor, determinando o intervalo de tempo no qual suas chaves irão alternar entre os estados ligado e desligado. Essa combinação de sinais de referência e onda portadora é essencial para a geração controlada e eficiente da forma de onda de saída desejada.

Figura 5 – Estratégia de modulação PWM de 2 níveis.



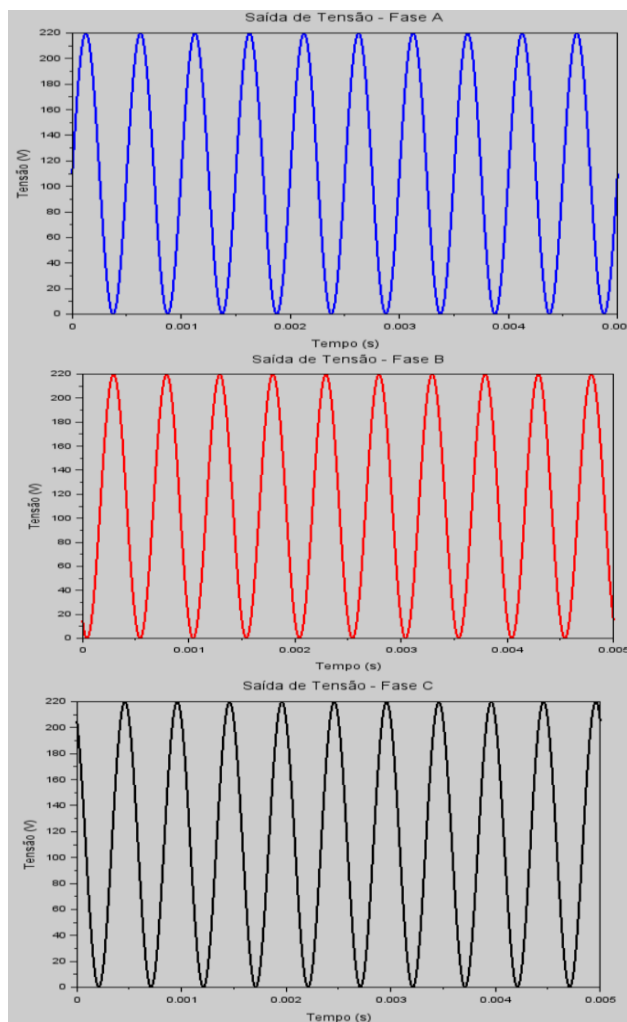
Fonte: FORTES, 2018.

A estratégia de PWM ilustrada na Figura 5 é conhecida como Modulação por Largura de Pulso Senoidal (SPWM) de 2 níveis. Além dessa abordagem, existem outras estratégias de modulação, como o PWM trapezoidal e a modulação por vetores espaciais, que se distinguem pela forma como os sinais de acionamento das chaves são gerados a cada ciclo. No entanto, todas essas estratégias compartilham o objetivo comum de reduzir a geração de componentes harmônicas nos terminais de saída dos inversores. A fim de ilustrar a forma de onda obtida em um inversor trifásico com técnica de modulação SPWM foi implementado um código no Software Scilab que seguiu os seguintes parâmetros e pode ser encontrado no **ANEXO A**:

- *Duty cycle*: 50%;
- Amplitude tensão = 220 V;
- Frequência de modulação = 2000 Hz;

Com isso, obteve-se a simulação das formas de onda de tensão na saída de um inversor trifásico com modulação SPWM mostradas na Figura 6.

Figura 6 – Formas de onda de tensão obtidas no Scilab para uma modulação SPWM de dois níveis em inversor trifásico.



Fonte: O Autor, 2024.

2.2.3. Inversores grid-tie

No caso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, os inversores utilizados são conhecidos como *grid-tie*. Esse tipo de inversor possui a capacidade de sincronizar a tensão da energia gerada pelos painéis solares com a tensão da rede elétrica pública, sendo uma das principais características desse tipo de inversor o controle preciso sobre a tensão, fase e frequência da corrente alternada (AC) produzida, garantindo que ela esteja em conformidade com os padrões da rede elétrica.

Os inversores estão sujeitos a gerar componentes harmônicos na corrente de linha, devido a irregularidades no sinal senoidal de referência das instalações elétricas, ao se utilizar

a frequência e a tensão da rede elétrica para chaveamento dos dispositivos semicondutores, na tentativa de se reproduzir uma onda que teoricamente deveria ser senoidal (JAFARIAN et al., 2018; GRAY; LEHN, 2016; WU et al., 2015). Tal situação pode ocorrer, comumente, durante os períodos de sombreamento, amanhecer e pôr do sol, ou seja, em momentos onde ocorre menor geração fotovoltaica por conta da baixa disponibilidade de irradiância.

2.3. DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Distúrbios em qualidade de energia elétrica são anomalias ou irregularidades na tensão, corrente e/ou frequência, que afetam de forma negativa o funcionamento das cargas conectadas nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Vale ressaltar que o termo “qualidade de energia elétrica”, em geral, compreende a qualidade das formas de onda da tensão e corrente elétricas em um sistema elétrico (DUGAN, R. C 2002). Esses fenômenos podem ser relacionados a interrupções na continuidade de energia elétrica, distorções harmônicas na forma de onda da corrente e tensão, interferência eletromagnética irradiada e conduzida; entre outros.

Nessa seção serão abordados os principais distúrbios relacionados à qualidade de energia elétrica tendo como base a Tabela 1. Para o presente trabalho serão mais explorados os parâmetros de níveis de tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica e flutuação de tensão.

O módulo 8 do PRODIST define os padrões para garantir a qualidade tanto do produto (energia elétrica) quanto do serviço de fornecimento de energia elétrica. Ele estabelece terminologia, indicadores, limites de referência e metodologia de medição para caracterizar e gerenciar reclamações sobre tensão e perturbações na forma de onda. Também inclui estudos específicos para acesso aos sistemas de distribuição. Além disso, estabelece uma metodologia para avaliar indicadores de continuidade do fornecimento e tempos de resposta a emergências, definindo padrões e responsabilidades para as concessionárias de energia elétrica.

A norma brasileira que rege os princípios de qualidade para a compatibilidade com a rede elétrica é a NBR 16149 de 2013, esta especifica os parâmetros que os inversores e sistemas fotovoltaicos devem cumprir em relação à nível de tensão, cintilação (flutuação de tensão), frequência, distorção harmônica e fator de potência. A norma especifica que caso os valores sejam ultrapassados, é de responsabilidade do inversor identificar o desvio e interromper o fornecimento de energia à rede (ABNT, 2013).

Tabela 1 – Categorias e características típicas dos fenômenos eletromagnéticos em sistemas de potência.

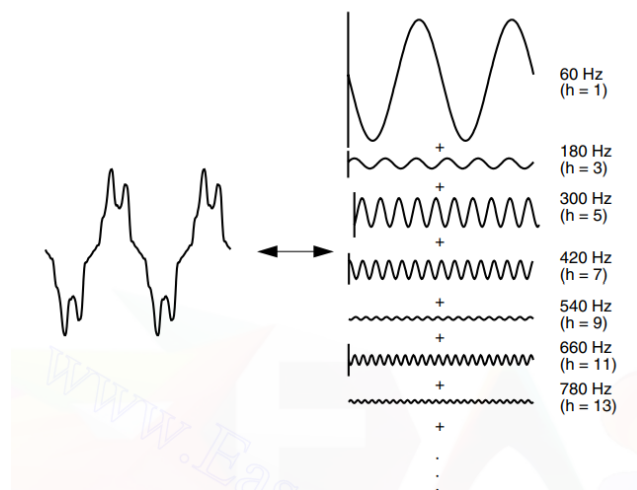
| Categorias | Conteúdo Espectral Típico | Duração Típica | Amplitude de Tensão Típica |
|--|---------------------------|-------------------|----------------------------|
| 1.0 Transitórios | | | |
| 1.1 Impulsivos | | | |
| 1.1.1 Nanosegundos | 5 ns (tempo de subida) | < 50ns | |
| 1.1.2 Microsegundos | 1 μs (tempo de subida) | 50ns – 1ms | |
| 1.1.3 Milissegundos | 0,1 ms (tempo de subida) | >1ms | |
| 1.2 Oscilatórios | | | |
| 1.2.1 Baixa frequência | < 5 kHz | 0,3 – 50ms | 0 – 4 pu |
| 1.2.2 Média frequência | 5 – 500 kHz | 20μs | 0 – 8 pu |
| 1.2.3 Alta frequência | 0,5 – 5 MHz | 5μs | 0 – 4 pu |
| 2.0 Variações de curta duração | | | |
| 2.1 Instantâneas | | | |
| 2.1.2 Afundamentos de tensão | | 0,5 – 30 ciclos | 0,1 – 0,9 pu |
| 2.1.2 Saltos de tensão | | 0,5 – 30 ciclos | 1,1 – 1,8 pu |
| 2.2 Momentâneas | | | |
| 2.2.1 Interrupção | | 0,5 ciclos – 3s | < 0,1 pu |
| 2.2.2 Afundamentos de tensão | | 30 ciclos – 3s | 0,1 – 0,9 pu |
| 2.2.3 Saltos de tensão | | 30 ciclos – 3s | 1,1 – 1,4 pu |
| 2.3 Temporárias | | | |
| 2.3.1 Interrupção | | 3s – 1min | < 0,1 pu |
| 2.3.2 Afundamentos de tensão | | 3s – 1min | 0,1 – 0,9 pu |
| 2.3.3 Saltos de tensão | | 3s – 1min | 1,1 – 1,2 pu |
| 3.0 Variações de longa duração | | | |
| 3.1 Interrupção sustentada | | >1min | 0,0 pu |
| 3.2 Subtensões | | >1min | 0,8 – 0,9 pu |
| 3.3 Sobretensões | | >1min | 1,1 – 1,2 pu |
| 4.0 Desbalanceamento | | | |
| 4.1 Tensão | | Regime Permanente | 0,5 – 2 % |
| 4.2 Corrente | | Regime Permanente | 1 – 30 % |
| 5.0 Distorção de forma de onda | | | |
| 5.1 Componente CC (dc offset) | | Regime Permanente | 0 – 0,1 % |
| 5.2 Harmônicos | 0 – 9 kHz | Regime Permanente | 0 – 20 % |
| 5.3 Inter harmônicos | 0 – 9 kHz | Regime Permanente | 0 – 2 % |
| 5.4 Corte (notching) Regime Permanente | | Regime Permanente | |
| 5.5 Ruído | Largura de banda | Regime Permanente | 0 – 1 % |
| 6.0 Flutuação de tensão | < 25 Hz | Intermitente | 0,1 – 7 % |
| 7.0 Variação de frequência | | < 10 s | ± 0,1 Hz |

Fonte: IEEE STANDARS BOARD. “IEEE Std 1159 - 2009 - Recommended Practice For monitoring Electric Power Quality”, EUA, 2009.

2.3.1. Distorções harmônicas

As distorções harmônicas são fenômenos que podem ocorrer em sistemas elétricos devido à presença de componentes de frequência não fundamental na forma de onda da corrente ou tensão. Esses fenômenos são associados a deformações nas formas de onda em relação à onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2015). O artifício matemático que permite representar uma forma de onda distorcida como a soma de várias ondas senoidais puras é conhecido como Transformada de Fourier. Cada uma dessas componentes senoidais representa um harmônico da forma de onda original. Na Figura 7 podemos observar que qualquer forma de onda periódica e distorcida pode ser expressa como uma soma de senoídes. A frequência de cada senoíde é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da onda distorcida. Este múltiplo é designado por harmônico da fundamental.

Figura 7 – Representação em série de Fourier de uma forma de onda distorcida.



Fonte: DUGAN, R. C. et. al. *Electrical Power Systems Quality*. 1996, p. 169.

2.3.1.1. Sequenciamento de fase

É importante frisar que quando uma carga trifásica é alimentada por uma rede trifásica a três fios, não há um condutor neutro disponível para fornecer um caminho de retorno para as correntes harmônicas de sequência zero, como as harmônicas de ordem 3 e seus múltiplos inteiros. As harmônicas de sequência zero são aquelas que têm a mesma magnitude e fase em todas as três fases do sistema trifásico. Em uma rede trifásica a três fios, onde não há condutor neutro, esses harmônicos não podem circular livremente, uma vez que não há um caminho de retorno para eles. Portanto, os harmônicos de ordem 3 e seus múltiplos, que são considerados harmônicos de sequência zero, estão ausentes em sistemas trifásicos alimentados a três fios. Na

Tabela 2 abaixo podemos evidenciar o sequenciamento de fases por ordem harmônica em uma rede trifásica.

Tabela 2 – Sequência de fase por ordem harmônica.

| Ordem | Frequência (Hz) | Sequenciamento |
|-------|-----------------|----------------|
| 1° | 60 | + |
| 2° | 120 | - |
| 3° | 180 | 0 |
| 4° | 240 | + |
| 5° | 300 | - |
| 6° | 360 | 0 |
| 7° | 420 | + |
| 8° | 480 | - |
| 9° | 540 | 0 |
| 10° | 600 | + |
| 11° | 660 | - |
| 12° | 720 | 0 |

Fonte: FORTES, Rarison, et. al. Propagação de harmônicas produzidas por inversores fotovoltaicos e transformadores assimetricamente magnetizados na geração distribuída. 2018, p. 203.

2.3.1.2. Geração de distorção harmônica

Em suma, esses fenômenos são causados por equipamentos com cargas não lineares conectadas a um sistema de potência. Esse tipo de equipamento normalmente é classificado em três grandes grupos.

- Equipamentos a arco - Quando um dispositivo opera em modo de arco elétrico, a corrente não flui de forma suave e senoidal, como em uma carga puramente resistiva, mas em pulsos rápidos e irregulares. Esses pulsos de corrente não senoidais introduzem componentes harmônicos na forma de onda da corrente elétrica, o que pode causar distorções na tensão da rede elétrica. São exemplos de equipamentos a arcos, fornos a arco, máquinas de solda, equipamentos de Plasma etc.;

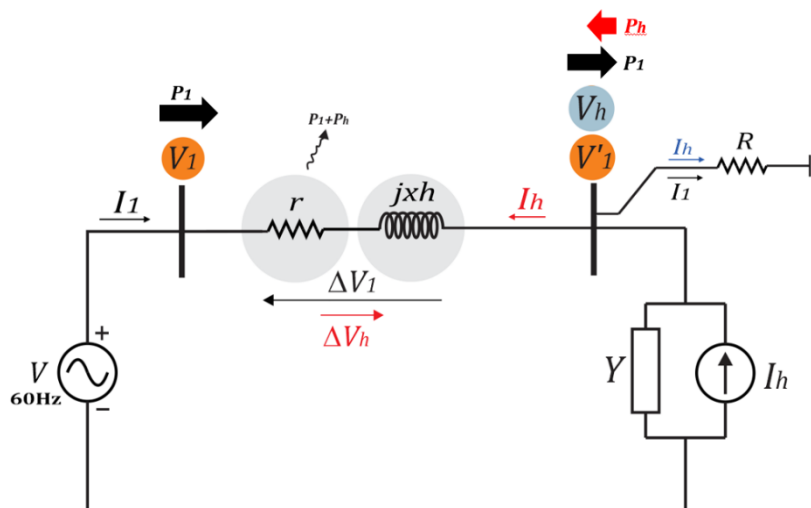
- Equipamentos baseados em circuitos magnéticos - Esse tipo de equipamento pode gerar distorções harmônicas devido a uma combinação de saturação do núcleo magnético, impedância não linear e comportamento não linear do material magnético. Em suma, a distorção harmônica gerada por esses dispositivos ocorre principalmente devido à saturação de núcleos

magnéticos, à não linearidade das características de corrente-tensão e às condições operacionais não lineares ou sobrecarregadas.

- Equipamentos de eletrônica de potência - A produção de componentes harmônicos em corrente e tensão por equipamentos de eletrônica de potência está relacionada principalmente ao processo de comutação utilizado para controlar o fluxo de energia. Dispositivos semicondutores, como diodos, transistores MOSFET, IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) produzem correntes não senoidais, mesmo quando alimentados por fontes de tensão senoidal. Alinhado a isso, mudanças repentinas na carga podem causar flutuações na corrente e retirada do suprimento de energia, introduzindo distorções harmônicas na rede elétrica.

Sendo assim, cargas não lineares surgem como fontes de corrente harmônica em derivação e injetam correntes harmônicas no sistema de alimentação. Observando a Figura 8 nota-se que a distorção da forma de onda de tensão é o resultado de correntes distorcidas que fluem através da impedância linear em série com o sistema de fornecimento de energia. As correntes harmônicas que passam através da impedância do sistema provocam uma queda de tensão para cada harmônica. Isto resulta no aparecimento de harmônicas de tensão no barramento de carga. A quantidade de distorção da tensão depende da impedância e da corrente (DUGAN, R. C).

Figura 8 – Correntes harmônicas resultando em tensões harmônicas na carga.



Fonte: (RUBENS J. 2022).

2.3.1.3. Efeitos das distorções harmônicas de corrente

A presença de distorção harmônica na rede elétrica pode ter vários efeitos indesejados, tanto em equipamentos e sistemas elétricos quanto nos consumidores de energia. Abaixo são descritos alguns problemas causados por esse fenômeno:

- **Sobreaquecimento de equipamentos** - As correntes harmônicas adicionais podem aumentar as perdas de energia e o aquecimento em transformadores, cabos, condutores e outros equipamentos elétricos. Isso pode reduzir a eficiência e a vida útil desses equipamentos, levando a falhas prematuras.
- **Distorção de tensão** - Distorção harmônica na corrente pode causar alteração da forma de onda da tensão elétrica. Isso pode levar a flutuações na tensão e afetar o desempenho de equipamentos sensíveis, como computadores, dispositivos eletrônicos e sistemas de controle.
- **Ressonância** - A presença de harmônicos pode induzir ressonância em sistemas elétricos, especialmente quando combinados com a capacitância e a indutância dos equipamentos e cabos. Isso pode resultar em sobretensões e sobrecorrentes em determinadas frequências de ressonância, podendo danificar equipamentos e causar interrupções no fornecimento de energia.
- **Perdas adicionais de energia** - As correntes harmônicas podem aumentar as perdas de energia nos sistemas elétricos devido ao aumento da resistência efetiva dos condutores e dos equipamentos. Isso pode levar a uma menor eficiência energética e a custos operacionais mais altos para os consumidores.
- **Interferência eletromagnética** - As correntes e tensões harmônicas podem causar interferência eletromagnética em sistemas de comunicação, equipamentos de medição e outros dispositivos sensíveis, levando a erros de medição, mau funcionamento e falhas de comunicação.

2.3.1.4. Indicadores de distorção harmônica

Para assegurar a operação adequada do sistema elétrico e da instalação, é necessário observar níveis específicos em cada etapa dos cálculos dos indicadores de distorção harmônica. A regulamentação vigente no Brasil que trata de limites harmônicos é o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) Módulo 8. Neste documento, são definidas metodologias de medição, instrumentação, terminologia e valores de referência para a distorção harmônica de tensão. No entanto, atualmente, essa

resolução não estabelece limites para harmônicos de corrente. A Tabela 3 a seguir mostra a terminologia aplicável para o cálculo dos indicadores de distorção harmônica.

Tabela 3 – Terminologia para cálculo de harmônicos.

| Identificação da Grandeza | Símbolo |
|--|----------|
| Distorção harmônica individual de tensão de ordem h | DITh% |
| Distorção harmônica total de tensão | DTT% |
| Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 | DTTP% |
| Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 | DTTI% |
| Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 | DTT3% |
| Tensão harmônica de ordem h | Vh |
| Ordem harmônica | h |
| Ordem harmônica máxima | hmáx |
| Ordem harmônica mínima | hmin |
| Tensão fundamental medida | V1 |
| Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas DTT95% | DTTP 95% |
| Valor do indicador DTTI% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas | DTTI 95% |
| Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas | DTT3 95% |

Fonte: PRODIST MÓDULO 8. p. 36.

O principal indicador utilizado para quantificar a distorção harmônica é a distorção harmônica total (DHT) e segundo o módulo da ANEEL que regulamenta as distorções harmônicas presentes no sistema, a DHT pode ser representada pela Equação 1.

$$DHT_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{hmáx} y_h^2}}{y_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

y_1 é o valor eficaz da onda fundamental;

y_h é o valor eficaz da componente harmônica de ordem h.

Entretanto, o uso da Equação 1 nem sempre é a melhor abordagem para se entender as distorções harmônicas. Por exemplo, alguns acionamentos com velocidade ajustável exibem altos valores de DHT para a corrente de entrada quando estão operando com cargas leves. Esse valor pode não ser uma preocupação significativa porque a magnitude da corrente é baixa mesmo com sua DHT sendo alta (DUGAN, R. C 2002). Portanto, apresenta-se o conceito de distorção total de demanda (DTD). Este indicador é utilizado pela recomendação IEEE 519 para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente da carga. Sua

formulação matemática é bastante similar ao DHT, tendo como diferença o fato de que a DTD é calculada em relação à corrente máxima da carga e a DHT utiliza a corrente fundamental no momento da medição (TEIXEIRA, 2009). O cálculo de DTD é mostrado na Equação 2.

$$DTD_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

I_L é a corrente eficaz de demanda máxima (corrente fundamental);

I_h é o valor eficaz da corrente harmônica de ordem h.

A norma NBR 16149 estabelece um limite para a distorção harmônica da corrente que o sistema fotovoltaico injeta na rede elétrica. Segundo esta norma, a distorção harmônica total (TDD) deve ser inferior a 5% em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor. Além disso, as harmônicas individuais de corrente devem ter valores abaixo dos especificados na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites individuais de distorção harmônica de corrente na saída do sistema fotovoltaico.

| Harmônicas ímpares | Limite de distorção |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 3 ^a a 9 ^a | 4,0% |
| 11 ^a a 15 ^a | 2,0% |
| 17 ^a a 21 ^a | 1,5% |
| 23 a 33 ^a | 0,6% |
| Harmônicas pares | Limite de distorção |
| 2 ^a a 8 ^a | 1,0% |
| 10 ^a a 32 ^a | 0,5% |

Fonte: NBR 16149.

O PRODIST – Módulo 8 também define os limites para os indicadores das distorções harmônicas totais de tensão, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

| Indicador | Tensão nominal | | |
|---------------------|---------------------------|--|---|
| | $V_n \leq 1,0 \text{ kV}$ | $1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$ | $69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$ |
| DTT _{95%} | 10,0% | 8,0% | 5,0% |
| DTT _{P95%} | 2,5% | 2,0% | 1,0% |
| DTT _{i95%} | 7,5% | 6,0% | 4,0% |
| DTT _{395%} | 6,5% | 5,0% | 3,0% |

Fonte: PRODIST MÓDULO 8. p. 15.

O Guia IEEE Std 519-1992 utiliza o DTD para quantificar a distorção de corrente. Os valores recomendados para os valores de DTD encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Limites de distorção de corrente (DTD) em relação à corrente fundamental.

| Nível de Tensão | Harmônicos individuais | | | | | | DTD(%) |
|------------------------|------------------------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|--------|
| | ICC/I _{carga} | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $h \geq 35$ | |
| $V \leq 69 \text{ kV}$ | <20 | 4 | 2 | 1,5 | 0,6 | 0,3 | 5 |
| | 20<50 | 7 | 3,5 | 2,5 | 1 | 0,5 | 8 |
| | 50<100 | 10 | 4,5 | 4 | 1,5 | 0,7 | 12 |
| | 100<1000 | 12 | 5,5 | 5 | 2 | 1 | 15 |
| | >1000 | 15 | 7 | 6 | 2,5 | 1,4 | 20 |

Fonte: IEEE Std 519-1992.

2.3.2. Desequilíbrios de tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema (ANEEL, 2015). Em uma abordagem mais matemática, o desequilíbrio de tensão pode ser expresso como o desvio máximo da média das tensões ou correntes trifásicas, dividido pela média das tensões ou correntes trifásicas, expresso em porcentagem (DUGAN, R. C 2002).

O desequilíbrio de tensão em sistemas trifásicos é um distúrbio da QEE que pode resultar em diversas consequências indesejadas, desde o funcionamento ineficiente dos equipamentos até a redução da vida útil dos componentes do sistema elétrico. Sua principal causa reside frequentemente em desigualdades na distribuição de carga ou em problemas relacionados à impedância dos componentes do sistema. Quando as cargas conectadas ao sistema elétrico não são distribuídas uniformemente entre as três fases, pode resultar em uma demanda desigual de energia em cada fase. Como resultado, algumas fases podem experimentar tensões mais elevadas do que outras, levando a um desequilíbrio de tensão. Para evitar

desbalanço de cargas na rede, deve-se distribuir equitativamente as cargas entre os diferentes circuitos, além de poder utilizar dispositivos de monitoramento de carga, como multimedidores.

No Brasil o PRODIST módulo 8 determina que o valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, exceto em baixa tensão, deve ser igual ou menor a 2%, enquanto em baixa tensão o valor é de 3%. O cálculo do fator de desequilíbrio (FD%) é definido pela Equação 3.

$$FD\% = \frac{V^-}{V^+} \times 100\% \quad (3)$$

Abaixo, na Tabela 7 podemos observar terminologia aplicável ao cálculo do desequilíbrio de tensão.

Tabela 7 – Terminologia para cálculo do desequilíbrio de tensão.

| IDENTIFICAÇÃO DA GRANDEZA | SÍMBOLO |
|---|-----------------------|
| Fator de desequilíbrio de tensão | FD |
| Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental | V- |
| Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental | V+ |
| Magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental | Vab, Vbc e Vca |
| Valor do indicador FD% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas | FD95% |

Fonte: PRODIST MÓDULO 8. p. 16.

A Tabela 8 evidencia os limites para o fator de desequilíbrio de tensão que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas (FD95%).

Tabela 8 – Limites para desequilíbrio de tensão.

| Indicador | Tensão nominal | |
|-----------|----------------|---------------------------|
| | FD95% | $V_n \leq 1,0 \text{ kV}$ |
| 3,00% | | 2,00% |

Fonte: PRODIST MÓDULO 8. p. 17.

2.3.3. Flutuações de tensão

A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. Em geral, as variações ficam entre 0,1% e 7% da tensão nominal com frequências inferiores a 25 Hz (BAGGINI. A, 2008). Equipamentos ou dispositivos que apresentam variações rápidas e contínuas de corrente (principalmente no componente reativo) podem causar flutuações de tensão e cintilação de luz.

Dentre os equipamentos que mais causam flutuação de tensão podemos citar o forno a arco, laminadores e máquinas elétricas de solda.

Dentre os principais efeitos da flutuação de tensão, tem destaque a cintilação luminosa (Efeito Flicker). É um fenômeno de variação rápida e perceptível da luminosidade em sistemas de iluminação incandescente, causado por flutuações na tensão elétrica. Isso pode ocorrer devido a várias razões, como a operação de equipamentos de potência variável. O termo "Flicker" é derivado da palavra em inglês para "cintilar" ou "piscar", e o efeito pode ser percebido como uma oscilação na intensidade da luz e sua caracterização se dá pela percepção pelo olho humano das variações do fluxo luminoso de uma lâmpada incandescente. Hoje em dia, com a substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico e posteriormente lâmpadas LED há uma diminuição no efeito percebido, apesar de continuar havendo flutuação de tensão.

As expressões para o cálculo Pst e Plt são descritas na Equação 4 e Equação 5, respectivamente.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314 P_{0,1} + 0,0525 P_1 + 0,0657 P_3 + 0,28 P_{10} + 0,08 P_{50}} \quad (4)$$

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3} \quad (5)$$

Onde P_i ($i = 0,1; 1; 3; 10; 50$) corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante i % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*): IEC 61000-4-15. *Flickermeter – Functional and Design Specifications*, enquanto, complementarmente, Plt corresponde a um valor representativo de doze amostras consecutivas de Pst.

Para questões regulamentadoras, o PRODIST módulo 8 adota os indicadores e procedimentos definidos pela IEC 61000 - 4 - 15 - *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications provenientes da International Electrotechnical Commission (IEC)*. A Tabela 9 abaixo evidencia a terminologia aplicada à formulação de cálculo do Efeito Flicker.

Tabela 9 – Terminologia Para cálculo de efeito Flicker.

| Identificação da Grandeza | Símbolo |
|---|----------------|
| Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração | P_{st} |
| Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração | P_{lt} |
| Valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas | Pst95% |

Fonte: PRODIST MÓDULO 8. p. 18

P_i ($i = 0,1; 1; 3; 10; 50$) corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante i % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*): IEC 61000-4-15. *Flickermeter – Functional and Design Specifications*, enquanto, complementarmente, P_{lt} corresponde a um valor representativo de doze amostras consecutivas de P_{st} .

O PRODIST – Módulo 8, também é responsável pela regulamentação dos limites a serem utilizados para avaliação do desempenho do sistema de distribuição, quanto às flutuações de tensão. A Tabela 10 fornece os limites a serem utilizados para a avaliação do desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão.

Tabela 10 – Limites para flutuação de tensão.

| Indicador | Tensão nominal | | |
|------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| | $V_n \leq 1,0kV$ | $1,0kV < V_n < 69kV$ | $69kV \leq V_n < 230kV$ |
| Pst95% | 1,0 pu | 1,5 pu | 2,0 pu |

Fonte: PRODIST MÓDULO 8. p.19.

Analisando a Tabela 10 podemos concluir que uma flutuação de até 5% de tensão é tolerado durante o respectivo tempo de observação. As amplitudes das flutuações de tensão podem ser limitadas pelo aumento da potência de curto-circuito. Isso pode ser potência de curto-circuito. Isso pode ser obtido, aumentando a potência do transformador que alimenta a carga flutuante.

2.3.4. Tensão em regime permanente

A fim de garantir o bom funcionamento do sistema elétrico, o agente regulador estabelece limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, além de também estabelecer os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, critérios de medição e de registro e prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores.

O termo “conformidade de tensão elétrica” refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos (ANEEL, 2015). A empresa responsável pela distribuição de energia elétrica precisa equipar-se com capacidades técnicas para monitorar continuamente a voltagem do sistema, agindo de forma proativa para evitar problemas.

A introdução de GD na rede provoca mudanças em vários aspectos, tais como o fluxo de potência, devido à presença de fluxo bidirecional de energia, bem como o padrão de perdas elétricas e o perfil de tensão da rede. A interação entre a potência injetada pelas unidades de geração distribuída (GD) com a rede possibilita mudanças na magnitude da tensão no ponto comum de conexão (PCC), que cresce à medida que mais painéis sejam conectados à rede e que depende também da incidência solar e de fatores como a configuração do alimentador, a localização geográfica da GD e o funcionamento dos outros sistemas de controle de tensão, tais como os bancos de capacitores chaveáveis e os transformadores e reguladores com taps (Ministério de Minas e Energia,).

A manutenção do nível de tensão em regime permanente deve ser monitorada em todo o sistema de distribuição, sendo dever da distribuidora possuir recursos e técnicas para esse fim. A conformidade da tensão deve ser verificada nos pontos de conexão à rede de distribuição, nos pontos de interconexão entre distribuidoras e nos pontos de conexão com unidades consumidoras, sendo este último o foco de análise deste trabalho.

A tensão em regime permanente deve ser avaliada por meio de um conjunto de leituras obtidas por medição apropriada, de acordo com a metodologia descrita para os indicadores individuais e coletivos, nas modalidades descritas no item 9.2.1. do módulo 8 do PRODIST.

Para cada tensão de referência, as leituras a ela associadas classificam-se em três categorias: adequadas, precárias ou críticas, baseando-se no afastamento do valor da tensão de leitura em relação à tensão de referência, como mostrado na Tabela 11. A ocorrência de valores adequados, precários e críticos é verificada a partir dos valores dos índices DRP (Duração relativa de transgressão de tensão precária) e DRC (Duração relativa de transgressão de tensão crítica). Abaixo a Equação 6 apresenta o cálculo para o indicador DR, bem como a Equação 7 apresenta o cálculo para DRC.

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100\% \quad (6)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100\% \quad (7)$$

Onde nlp representa o número de leituras da fase com tensão de atendimento precária, em base semanal, enquanto nlc trata do número de leituras da fase com tensão de atendimento crítica, em base semanal. O limite para DRP é 3%, enquanto para DRC é de 0,5%.

A Tabela 11 mostra os pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220).

Tabela 11 – Limites de tensão de regime permanente tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220).

| Tensão de Atendimento | Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts) |
|------------------------------|--|
| Adequada | (350 ≤ TL ≤ 399) / (202 ≤ TL ≤ 231) |
| Precária | (331 ≤ TL < 350 ou 399 < TL ≤ 403) / (191 ≤ TL < 202 ou 231 < TL ≤ 233) |
| Crítica | (TL < 331 ou TL > 403) / (TL < 191 ou TL > 233) |

Fonte: PRODIST MÓDULO 8. p.41.

2.3.5. Variações de tensão de curta duração

O PRODIST Módulo 8 define uma variação de tensão de curta duração como um desvio significativo na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Essas variações de tensão são resultantes de faltas no sistema de potência, energização de transformadores e partida de cargas pesadas, situação em que as cargas têm seu funcionamento interrompido ou prejudicado.

As variações de tensão de curta duração podem ser classificadas em relação à duração fenômeno em dois grandes tipos, momentâneas e temporárias, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.

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

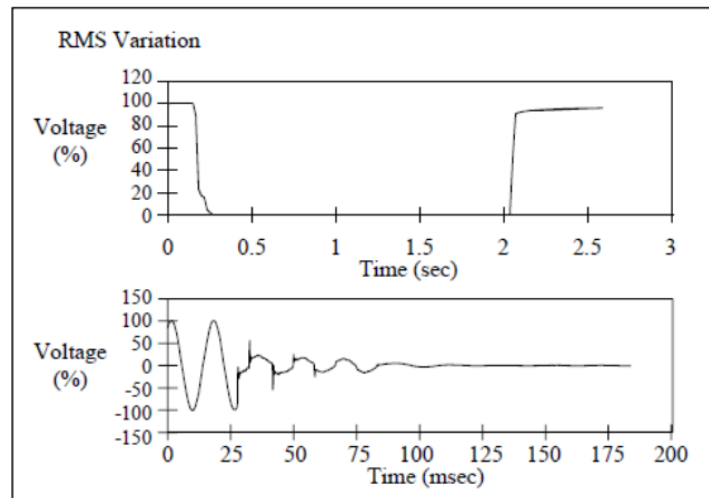
Fonte: PRODIST MÓDULO 8. p.20.

Variações momentâneas de tensão tem sua duração inferior ou igual a três segundos, enquanto variações temporárias de tensão tem duração entre três segundos e inferior a três minutos.

Além disso, variações de tensão de curta duração também são classificadas pela amplitude da tensão medida em relação a tensão de referência, podendo ser uma interrupção, afundamento ou elevação de tensão.

- Interrupções de tensão - Caracterizadas pela redução da tensão para valores abaixo de 10% da tensão base do sistema,. Normalmente, as interrupções são causadas pela ação do religador frente a faltas temporárias na rede e falhas em equipamentos. A Figura 9 ilustra uma interrupção de tensão.

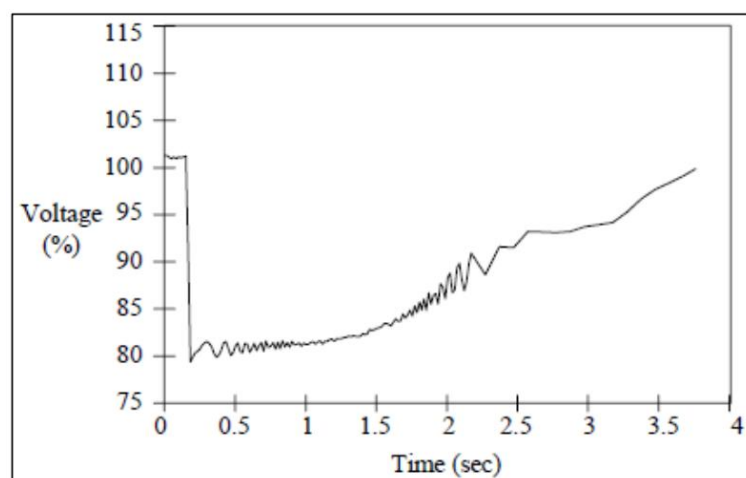
Figura 9 – Interrupção momentânea devido à falta e subsequente restabelecimento da tensão elétrica.



Fonte: IEEE. *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, 2009, p. 11.

- Afundamentos de tensão – Segundo a norma IEEE Std 1159-1995, define-se afundamento de tensão como “um decréscimo entre 0,1 e 0,9 p.u. do valor eficaz da tensão nominal, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto”. Também pode ser chamado de *Voltage Sag* ou *Voltage Dip*. De acordo com esta norma um afundamento de tensão com intensidade menor do que 0,1 p.u. é considerado interrupção. A Figura 10 exemplifica um afundamento de tensão causado pelo acionamento de um motor de alta potência. Pode ser evidenciado que conforme o motor parte e atinge sua velocidade nominal o nível de tensão volta a se estabelecer.

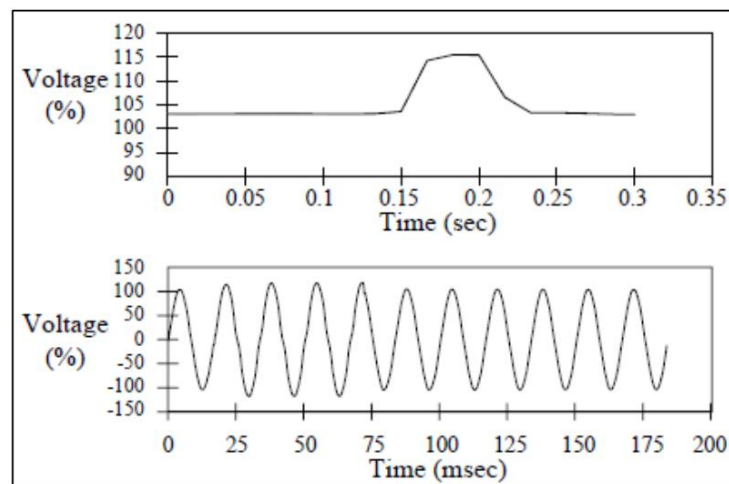
Figura 10 – Afundamento de tensão causado pelo acionamento de um motor.



Fonte: IEEE. *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, 2009, p. 13.

- Elevação de tensão - São distúrbios que podem ser caracterizados por um aumento da tensão eficaz do sistema (aumento este entre 10% e 80% da tensão, na frequência da rede, com duração de meio ciclo a 1 min). Elevações de tensão são associadas às condições de faltas fase-terra ou fase-fase-terra no sistema, mas não são tão comuns como afundamentos de tensão e costumam acontecer em apenas uma fase do sistema trifásico. A Figura 11 ilustra uma elevação de tensão causada por falta fase-terra.

Figura 11 – Elevação de tensão causada por falta fase-terra.



Fonte: IEEE. *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, 2009, p. 14.

3. ESTUDO DE CASO

Este capítulo tem como propósito elucidar os principais aspectos metodológicos adotados na pesquisa conduzida para a composição desta monografia. As principais características dos sistemas fotovoltaicos estudados são apresentadas e exploradas, indicando as especificações referentes a cada um deles. Foram feitos dois conjuntos de medidas em diferentes UCs com geração distribuída, das quais são mostradas as principais características de cada instalação.

3.1. METODOLOGIA ADOTADA PARA MEDIÇÃO DE ENERGIA

O monitoramento da qualidade de energia é o processo de coletar, analisar e interpretar os dados das medições em informações úteis. O processo de coleta de dados geralmente é realizado por medição de corrente e tensão por um período prolongado (DUGAN, R. C 2002). o monitoramento foi realizado de acordo com a seção 5 do Módulo 3 do PRODIST que trata de requisitos técnicos mínimos para os equipamentos de medição de uso temporário.

Os conjunto de leituras para gerar as análises dispostas no Capítulo 4 contam com registros 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 9.1.6.2. do Módulo 8 do PRODIST. Foram analisadas distorções harmônicas de tensão, nível de tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, distúrbios de tensão, além da análise das curvas de carga de cada UC.

3.2. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

As medições foram realizadas utilizando-se um analisador de qualidade de energia da marca IMS, modelo PowerNET PQA-700 G5, Classe , sendo capaz de amostrar os dados em conformidade com as recomendações do Módulo 8 do PRODIST, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15 e IEC 61000-4-30 (Classe S). O equipamento pode ser evidenciado na Figura 12.

Figura 12 – Analisador de qualidade de energia PQA-700 G5.



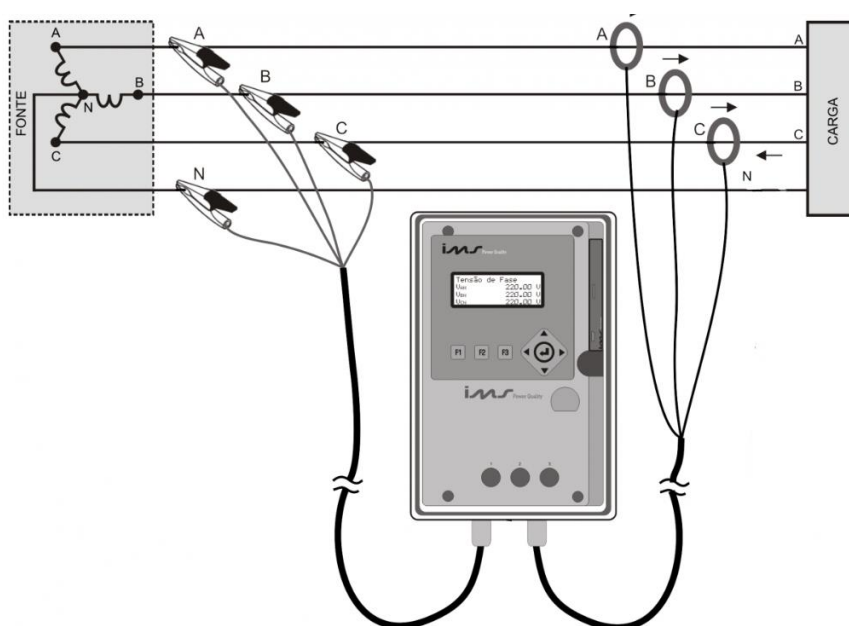
Fonte: IMS, 2024.

O PowerNET PQA-700 realiza medições em regime permanente das principais grandezas elétricas relacionadas à qualidade da energia elétrica, entre elas os harmônicos e inter-harmônicos, flutuações (Flicker) e desequilíbrio, disponibilizando os valores mínimos, máximos e médios de cada grandeza, conforme intervalo programado. A aquisição dos dados é feita em tempo real e sem perda de informação dos sinais, possibilitando medições contínuas e

precisas. A digitalização dos sinais analógicos é realizada simultaneamente, com resolução de 24 bits e taxa de amostragem de 20480 amostras por segundo.

O equipamento conta com 3 alicates rígidos de com TCs de FeSi com isolamento galvânica para medições de corrente com fundo de escala de 100 A. Além disso, conta com garras tipo jacaré (ou golfinho) para obter as medições de tensão elétrica. Para todas as medições o PowerNET PQA-700 G5 foi conectado ao ponto de conexão das respectivas UCs, conforme método exposto no manual do fabricante, ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Esquema de ligação utilizado para conectar o analisador da qualidade de energia elétrica.



Fonte: IMS, 2024.

3.3. SOFTWARE DE MEDIÇÃO

Para realizar as análises dos dados adquiridos pelo analisador de qualidade de energia PQA-700 G5 foi utilizado o software PowerMANAGER desktop. Trata-se de uma ferramenta para análise de dados coletados em tempo real ou armazenados em dispositivos de memória de massa, gerando tabelas, gráficos e relatórios. O software oferece uma interface amigável de parametrização de equipamentos e seu controle através de interfaces locais e remotas (IMS, 2024).

O PowerMANAGER desktop tem uma interface gráfica do usuário como menus, guias e barras semelhante aos aplicativos Microsoft Office. Esses elementos são disponibilizados ao

executar o programa e podem ser modificados pelo usuário. As opções são habilitadas de acordo com a licença adquirida, o tipo de aplicação e os equipamentos conectados, para esse estudo de caso foi utilizada a versão PRO.

3.4. MEDIÇÕES MERCADO SUPER GRINGA

O primeiro conjunto de 1008 registros válidos foi obtido no ponto de conexão de uma instalação elétrica em um mercado de pequeno porte, chamado Super Gringa. O estabelecimento conta com dois conjuntos de painéis fotovoltaicos separados, um sobre o próprio mercado no ponto A e outro no estacionamento, ponto B, conforme representado na Figura 14, que evidencia também as coordenadas geográficas do local em questão.

Figura 14 – Vista aérea dos painéis fotovoltaicos instalados no mercado Super Gringa.



Fonte: Google Maps, 2024.

O inversor fotovoltaico presente na instalação é um inversor trifásico Renovigi, modelo RENO-30K, que produz 30kW de potência nominal, uma tensão de saída C.A de 176V a 242V com corrente máxima de 50A. O inversor fotovoltaico pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Inversor fotovoltaico instalado no mercado Super Gringa.



Fonte: O Autor, 2024.

A seguir, na Tabela 13 são mostradas as principais especificações do inversor visto na Figura 15.

Tabela 13 – Especificações inversor fotovoltaico RENO-30K.

| Modelo de Inversor | RENO 30K |
|--|-------------------|
| Entrada (CC) | |
| Potência máxima CC (W) | 36000 |
| Tensão máxima CC (V) | 1000 |
| Faixa de tensão MPPT (V) | 200-800 |
| Tensão de Inicialização (V) | 350 |
| Máxima corrente de entrada por MPPT (A) | 18 |
| Máxima corrente de curto circuito por MPPT (A) | 23.4 |
| Número MPPT/Strings por MPPT | 4 / 2 |
| Saída (CA) | |
| Potência nominal de saída (W) | 30000 |
| Máxima potência de saída (W) | 33000 |
| Máxima potência aparente de saída (VA) | 33000 |
| Tensão nominal da rede (V) | 380 |
| Faixa de tensão de operação por fase (V) | 176 - 242 |
| Frequência nominal da rede (Hz) | 60 |
| Máxima corrente de saída (A) | 50 |
| Fator de potência (ajustável) | -0.8...1...+0.8 |
| Harmônicas | <3% |
| Eficiência | |
| Máxima eficiência | 98.7% |
| Euro eficiência | 98.3% |
| MPPT eficiência | 99.5% |
| Dados Gerais | |
| Dimensões (L*A*P) (mm) | 530*700*357 |
| Peso (kg) | 58.2 |
| Temperatura ambiente (°C) | -25 ~ 60 |
| Proteção | IP65 |
| Emissão de ruído (dBA) | <30 |
| Tipo de resfriamento | Convecção natural |
| Consumo interno (noite) (W) | < 1 |
| Topologia | Sem isolamento |

Fonte: Catálogo RENO-30K, 2024.

Para a instalação do PQA foram tomados os três pontos de tensão e corrente, conforme ilustrado na Figura 16, que evidencia os pontos de conexão de cada terminal para cada fase da instalação.

Figura 16 – Medições realizadas no mercado Super Gringa.



Fonte: O Autor, 2024.

As medições de tensão elétrica foram feitas pelas garras representadas por Va, Vb e Vc, enquanto que as medições das correntes foram feitas através de alicates rígidos indicados por Ia, Ib, e Ic. Devido ao difícil acesso, a corrente Ic teve de ser medida a jusante do medidor bidirecional, sem romper o lacre da concessionária Rio Grande Energia (RGE).

Para garantir a correta instalação do analisador de energia, verificou-se o valores instantâneos medidos para assegurar que estavam condizentes. Como pode ser visto na Figura 17, a instalação foi feita no dia 20/04/2024 às 12:38 em uma rede trifásica onde a tensão de fase nominal é de 220V e no determinado momento havia exportação de energia para a rede por parte da fase A e fase B. Entretanto, devido à alta carga da fase C naquele dado momento fez com que o consumo da UC ainda fosse positivo, de modo a consumir energia da rede elétrica em geral.

Figura 17 – Valores instantâneos da medição em mercado Super Gringa.

| | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|--|
| Relógio | | Fuso horário | | Horário de verão | |
| 20/04/2024 12:38:13 | | UTC -3:00 | | Não | |
| Tensão de fase | | | | | |
| Tensão fase média [V] | Tensão fase A [V] | Tensão fase B [V] | Tensão fase C [V] | | |
| 217,9 v | 218,7 v | 223,6 v | 211,3 v | | |
| Tensão de linha | | | | | |
| Tensão linha média [V] | Tensão linha AB [V] | Tensão linha BC [V] | Tensão linha CA [V] | | |
| 377,3 v | 378,5 v | 377,1 v | 376,4 v | | |
| Corrente | | | | | |
| Corrente média [A] | Corrente fase A [A] | Corrente fase B [A] | Corrente fase C [A] | Corrente neutro [A] | |
| 20,62 A | 11,04 A | 13,24 A | 37,60 A | 51,39 A | |
| Potência ativa | | | | | |
| Potência ativa total [W] | Potência ativa fase A [W] | Potência ativa fase B [W] | Potência ativa fase C [W] | | |
| 1,182 kW | -2,352 kW | -2,937 kW | 6,471 kW | | |

Fonte: PowerMANAGER Desktop, 2024.

3.5. MEDIÇÕES MONTA BRASIL

O segundo conjunto de 1008 registros válidos foi obtido no ponto de conexão de uma instalação elétrica, em uma fábrica de placas de circuito impresso, chamada Monta Brasil. O estabelecimento conta com um conjunto de painéis fotovoltaico sobre a própria fábrica e tem sua vista aérea mostrada na Figura 18, que evidencia também as coordenadas geográficas do local em questão.

Figura 18 – Vista aérea dos painéis fotovoltaicos instalados na empresa Monta Brasil.



Fonte: Google Maps, 2024.

O inversor fotovoltaico presente na instalação é um inversor trifásico Renovigi, modelo RENO-30K-NG-HC, que produz 30 kW de potência nominal, uma tensão de saída C.A de 176V a 242V com corrente máxima de saída de 50,2 A. O inversor fotovoltaico instalado pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Inversor fotovoltaico instalado na empresa Monta Brasil.



Fonte: O Autor, 2024.

A seguir, na Tabela 14 são mostradas as principais especificações do inversor visto na Figura 19.

Tabela 14 – Especificações inversor fotovoltaico RENO-30K-NG-HC.

| Modelo de Inversor | RENO-30K-NG-HC |
|--|----------------------------------|
| Entrada (CC) | |
| Potência máxima CC (W) | 45000 |
| Tensão máxima CC (V) | 1100 |
| Faixa de tensão MPPT (V) | 200 - 1000 |
| Tensão de Inicialização (V) | 180 |
| Máxima corrente de entrada por MPPT (A) | 32 |
| Máxima corrente de curto circuito por MPPT (A) | 50 |
| Quantidade de MPPT / Quantidade de entradas por MPPT | 3/2 |
| Saída (CA) | |
| Potência nominal de saída (W) | 30000 a 40 °C |
| Máxima potência de saída (W) | 33000 a 40 °C |
| Máxima potência aparente de saída (VA) | 33000 a 40 °C |
| Tensão nominal da rede (V) | 3/N/PE, 220/380, 230/400 |
| Faixa de tensão de operação por fase (V) | 176 - 242 |
| Frequência nominal da rede (Hz) | 60 |
| Máxima corrente de saída (A) | 50,2 |
| Fator de potência (ajustável) | 0,8 atrasado a 0,8 adiantado |
| Harmônicas | < 3% |
| Eficiência | |
| Máxima eficiência | 98,5% |
| Euro eficiência | 98,1% |
| MPPT eficiência | >99,5% |
| Dados Gerais | |
| Dimensões (LxA'P) (mm) | 647*629*252 |
| Peso (kg) | 37 |
| Temperatura ambiente (°C) | -25 ~ 60 |
| Proteção | IP66 |
| Tipo de resfriamento | Ventilação forçada (Inteligente) |
| Consumo interno (noite) (W) | <1 |
| Topologia | Sem transformador |
| Monitoramento | Reno Up |
| Comunicação | WiFi Plug II |

Fonte: Catálogo RENO-30K, 2024.

Para a instalação do analisador de energia elétrica foram tomados três pontos tensão e corrente, conforme ilustrado na Figura 20, que evidencia os pontos de conexão de cada terminal para cada fase da instalação.

Figura 20 – Medições realizadas na fábrica Monta Brasil.



Fonte: O Autor, 2024.

As medições de tensão elétrica foram feitas pelas garras representadas por Va, Vb e Vc, enquanto que as medições das correntes foram feitas através de alicates rígidos indicados por Ia, Ib, e Ic.

Novamente, verificaram-se os valores instantâneos medidos para assegurar que os valores medidos estavam condizentes com o esperado, conforme mostrado na Figura 21. A instalação foi feita no dia 29/05/2024 às 15:27 em uma rede trifásica onde a tensão de fase nominal é de 220V e no determinado momento havia exportação de energia para a rede por parte da fase A. Entretanto, devido à alta carga da fase B e da fase C naquele dado momento fez com que o consumo da UC ainda fosse positivo, de modo a consumir energia da rede elétrica em geral.

Figura 21 – Valores instantâneos da medição na empresa Monta Brasil.

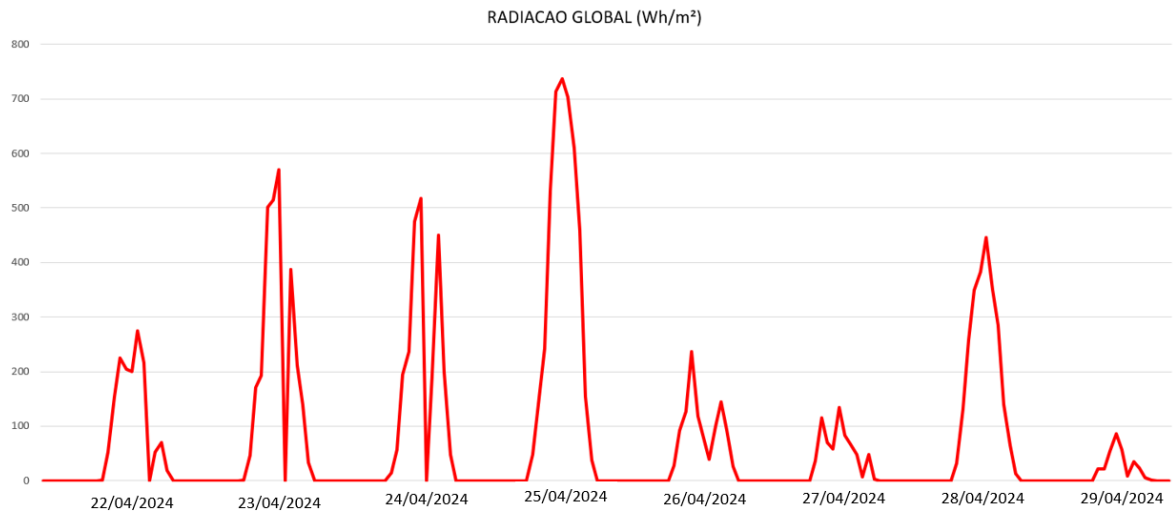
| | | | | |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|
| Data e Hora | | | | |
| Relógio | | Fuso horário | | Horário de verão |
| 29/05/2024 15:27:17 | | UTC -3:00 | | Não |
| Tensão de fase | | | | |
| Tensão fase média [V] | Tensão fase A [V] | Tensão fase B [V] | Tensão fase C [V] | |
| 219,7 V | 224,8 V | 215,4 V | 219,9 V | |
| Tensão de linha | | | | |
| Tensão linha média [V] | Tensão linha AB [V] | Tensão linha BC [V] | Tensão linha CA [V] | |
| 380,4 V | 383,1 V | 378,1 V | 380,1 V | |
| Corrente | | | | |
| Corrente média [A] | Corrente fase A [A] | Corrente fase B [A] | Corrente fase C [A] | Corrente neutro [A] |
| 13,94 A | 4,618 A | 22,63 A | 14,56 A | 18,82 A |
| Potência ativa | | | | |
| Potência ativa total [W] | Potência ativa fase A [W] | Potência ativa fase B [W] | Potência ativa fase C [W] | |
| 7,245 kW | -387,8 W | 4,763 kW | 2,870 kW | |

Fonte: PowerMANAGER Desktop, 2024.

4. RESULTADOS

Primeiramente, neste estudo, será realizada uma análise de qualidade de energia no supermercado Super Gringa. As medidas foram obtidas no período de 22 de abril de 2024 às 15:57 até 29 de abril de 2024 às 18:50. Durante esse intervalo, foi monitorado parâmetros de tensão e corrente elétrica para avaliar a conformidade com os padrões estabelecidos. Os níveis de irradiância relevantes para este estudo são divulgados pelo portal do INMET e podem ser visualizados na Figura 22. A localização da estação meteorológica fica em Porto Alegre, cerca de 20 km distante do local de medição. Essas informações são cruciais para entender como variáveis ambientais, como a irradiância solar, podem influenciar a qualidade de energia no estabelecimento.

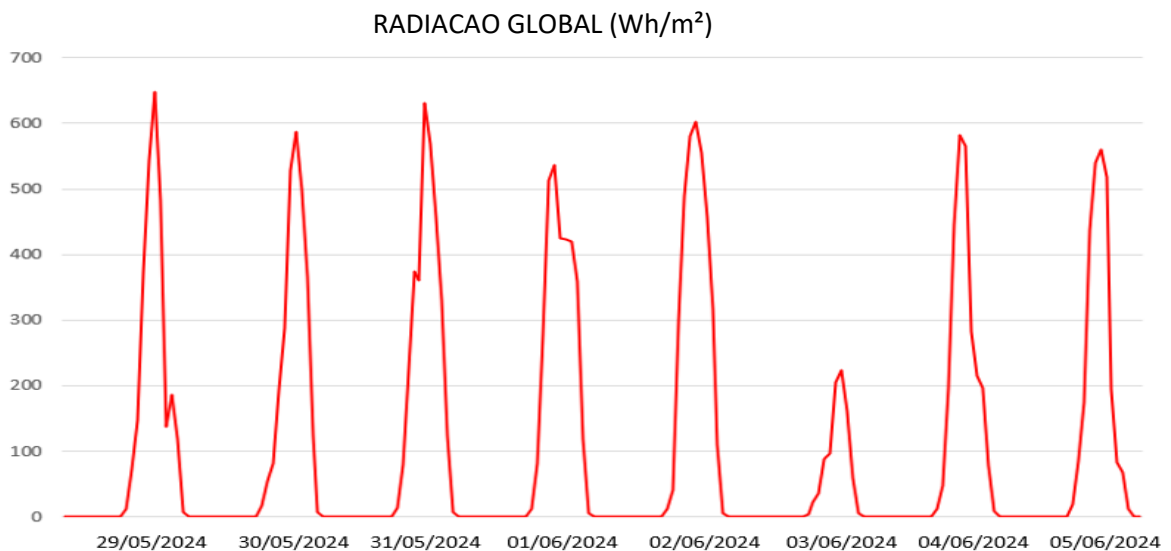
Figura 22 – Níveis de irradiância no período de medição – Super Gringa.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (2024).

Após a análise de qualidade de energia no supermercado Super Gringa, foi realizada a mesma análise na empresa de placas de circuito impresso Monta Brasil. As medições na Monta Brasil ocorreram no período de 29 de maio de 2024 às 15:26 até 5 de junho de 2024 às 17:50. Esta segunda análise permitirá comparar os resultados e avaliar a consistência dos parâmetros de qualidade de energia em diferentes tipos de estabelecimentos. Na Figura 23 podemos observar os níveis de irradiância relevantes para este estudo divulgados pelo portal do INMET para o período pertinente.

Figura 23 – Níveis de irradiância no período de medição – Monta Brasil.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (2024).

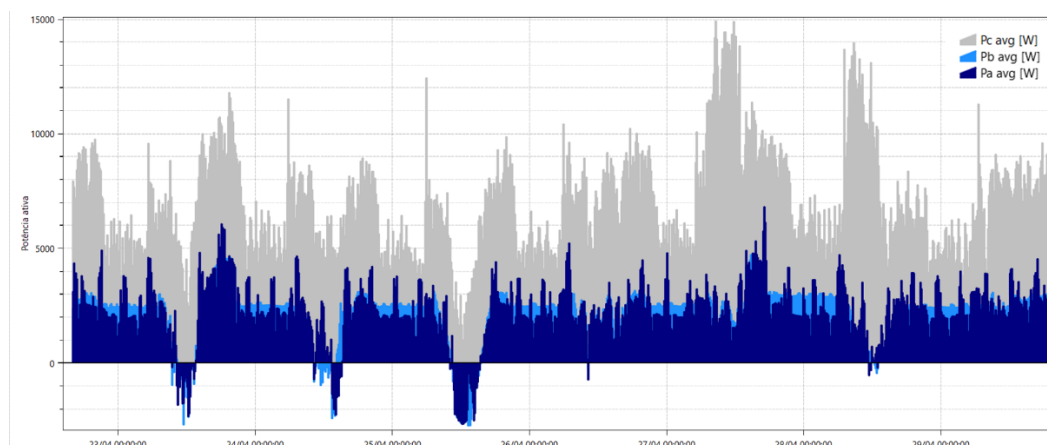
4.1. ANÁLISE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA MERCADO SUPER GRINGA

4.1.1. Análise das curvas de carga

O primeiro conjunto de medições foi obtido em um mercado de pequeno porte. O estabelecimento conta com equipamentos e máquinas elétricas como câmaras frias, fritadeiras elétricas, ares condicionados, forno elétrico, máquinas de corte e freezers. Além disso, o mercado opera todos os dias começando as atividades às 7 horas da manhã e encerrando às 21 horas.

O gráfico das potências ativas das fases A, B e C é exposto na Figura 24. Pode ser notado que há um nítido desequilíbrio de cargas no sistema trifásico, uma vez que a fase C apresenta valores de potência muito maiores que as demais fases. Esse desequilíbrio pode gerar aumento das perdas elétricas, vibrações e ruídos em máquinas, falhas em motores elétricos, entre outros.

Figura 24 – Curvas de potência ativa por fase – Super Gringa.



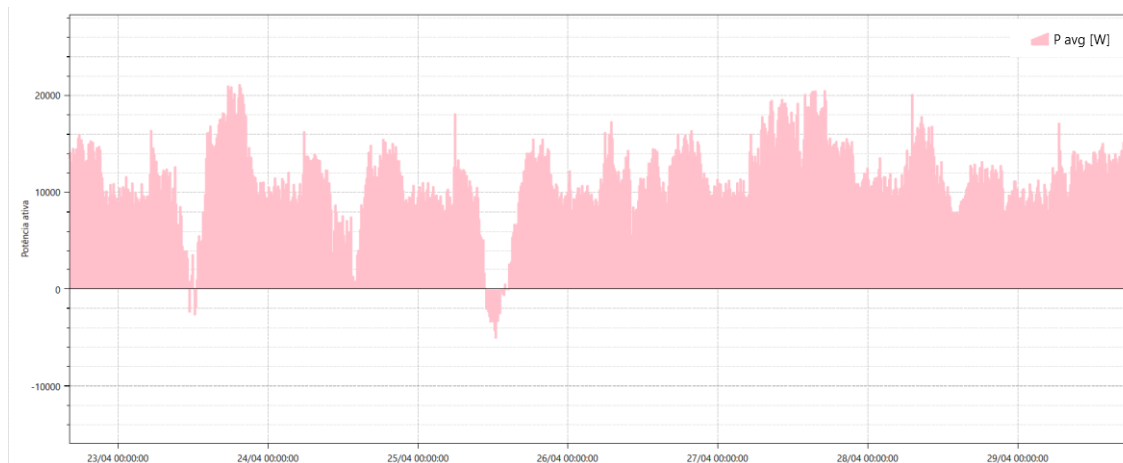
Fonte: O Autor, 2024.

Pode ser visto também que a maioria das cargas não é desligada a noite, por se tratar de câmaras frias e freezers, além disso, nos dias em que houve pouca geração de energia por parte do inversor fotovoltaico a potência ativa das fases A e B praticamente se mantém o mesmo nível de potência. Enquanto isso, a fase C apresenta um comportamento mais intermitente, com picos de consumo (geralmente no início do dia com o acionamento de equipamentos do açougue e padaria).

Durante o período de medição houve a exportação de energia por parte da UC apenas em dois dias, 23/04/2024 e 25/04/2024, dias em que houve maior nível de irradiância solar,

conforme mostrado anteriormente na Figura 22. O comportamento da potência ativa trifásica pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Curvas de potência ativa total– Super Gringa.



Fonte: O Autor, 2024.

4.1.2. Análise do comportamento do nível de tensão em regime permanente

Observando os registros obtidos por faixa e os respectivos indicadores obtidos dispostos na Tabela 15 podemos afirmar que as fases A e B tiveram todos 1008 registros dentro da faixa adequada de tensão. Entretanto, na fase C houve desconformidade quanto ao parâmetro de nível de tensão fase-neutro. Foram evidenciados 3 registros na faixa de nível de tensão precária, o que acarreta um valor de 0,30% obtido no indicador de DRP. Tais registros influenciaram diretamente no fator de desequilíbrio da tensão no período em que ocorreram. Nenhum registro em faixa crítica foi obtido.

Tabela 15 – Indicadores de nível de tensão em regime permanente – Super Gringa.

| Registros por faixa | | | | Indicadores | | |
|---------------------|----------|----------|---------|-------------|-----------|------------|
| Fase | Adequado | Precário | Crítico | | Valor [%] | Limite [%] |
| VaN | 1008 | 0 | 0 | | | |
| VbN | 1008 | 0 | 0 | DRP | 0,30 | 3,00 |
| VcN | 1005 | 3 | 0 | DRC | 0,00 | 0,50 |

Fonte: O Autor, 2024.

Em relação aos índices DRC, não houve registros na zona crítica de classificação em nenhuma das fases, logo DRC teve valor igual a zero.

Em relação aos valores mínimos e máximos para tensão fase-neutro, estão expostos na Tabela 16. Nota-se que a desconformidade de maior valor relativo quanto ao nível de tensão

fase-neutro na fase C foi quando houve o registro do valor de 199,33V no dia 27/04/2024 às 8:40. Esse valor está na faixa precária, conforme exigido pelo PRODIST na Tabela 11.

Além disso, houve mais dois registros precários da tensão de fase-neutro da fase C, também no dia 27/04/2024, às 8:30 obteve-se o valor de 200,32V e às 8:50 obteve-se o valor de 200,47V.

Tabela 16 – Valores mínimos e máximos de tensão fase-neutro em regime permanente – Super Gringa.

| Mínimos | | | |
|----------------|-----------|------------|------------------|
| Fase | Valor [V] | Data | Hora |
| VaN | 204,74 | 23/04/2024 | 18:30:00.0590000 |
| VbN | 210,12 | 23/04/2024 | 17:20:00.0970000 |
| VcN | 199,33 | 27/04/2024 | 08:40:00.0370000 |
| Máximos | | | |
| Fase | Valor [V] | Data | Hora |
| VaN | 221,25 | 24/04/2024 | 02:20:00.1750000 |
| VbN | 225,83 | 24/04/2024 | 02:20:00.1750000 |
| VcN | 221,89 | 24/04/2024 | 02:10:00.1980000 |

Fonte: O Autor, 2024.

Os valores mínimos e máximos para tensão de linha estão expostos na Tabela 17. Todos os valores máximos e mínimos obtidos para cada tensão de linha de cada fase estão em conformidade com o exigido pelo PRODIST na Tabela 11.

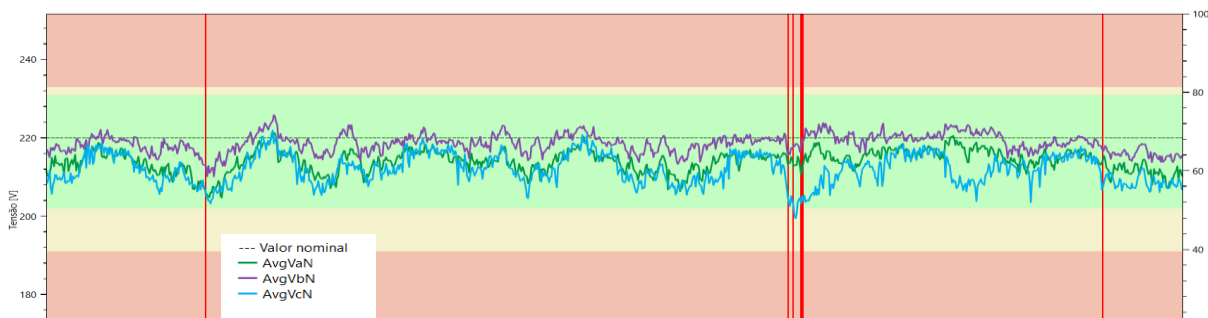
Tabela 17 – Valores mínimos e máximos de tensão de linha em regime permanente – Super Gringa.

| Mínimos | | | |
|----------------|-----------|------------|------------------|
| Linha | Valor [V] | Data | Hora |
| Uab | 357,22 | 23/04/2024 | 16:40:00.1440000 |
| Ubc | 357,63 | 23/04/2024 | 16:20:00.0500000 |
| Uca | 357,92 | 23/04/2024 | 16:40:00.1440000 |
| Máximos | | | |
| Linha | Valor [V] | Data | Hora |
| Uab | 384,04 | 24/04/2024 | 02:30:00.0020000 |
| Ubc | 386,54 | 24/04/2024 | 02:10:00.1980000 |
| Uca | 384,90 | 24/04/2024 | 02:10:00.1980000 |

Fonte: O Autor, 2024.

Na Figura 26 podemos observar o comportamento do nível de tensão durante todo o período de medição. As linhas verticais em vermelho representam os distúrbios de tensão que ocorreram durante a medição, invalidando os registros para análise nesse caso.

Figura 26 – Nível de tensão de fase durante as medições – Super Gringa.

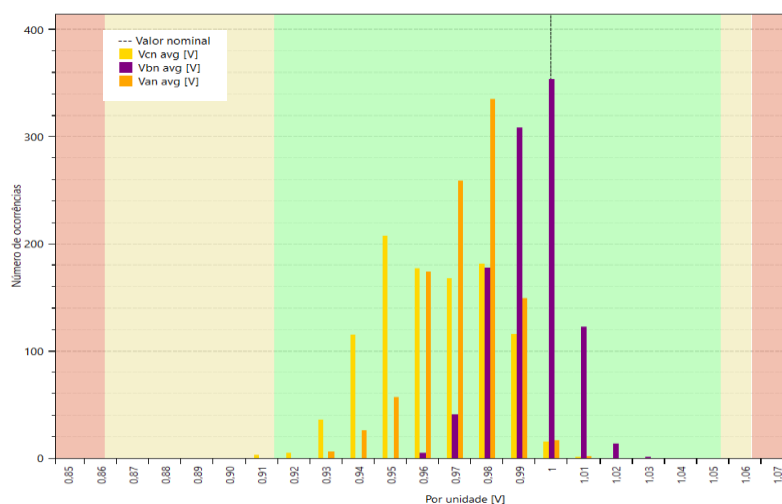


Fonte: O Autor, 2024.

Percebe-se que o valor mínimo de tensão da fase C ocorreu quando houve diversos distúrbios de tensão, causando uma queda no nível de tensão de fase. Vale ressaltar que nesse dia choveu forte de maneira torrencial durante todo o dia. Além disso, a fase C apresenta cargas mais pesadas do que as demais fases, ficando suscetível a afundamentos de tensão, uma vez que as cargas do estabelecimento não estão balanceadas corretamente, como foi discutido anteriormente.

Analisando o histograma de tensões durante todo o período de medição, exposto na Figura 27, pode-se quantificar o número de ocorrência de acordo com o patamar de tensão alcançado.

Figura 27 – Histograma das tensões durante o período de medição.



Fonte: O Autor, 2024.

Com isso, consegue-se afirmar que o maior número de tensões está abaixo do patamar de 1,00 p.u. para as fases A, B e C. A fase B se destacou em relação às demais, atingindo mais de 100 registros com o patamar de 1,01 p.u. e com o maior número de ocorrências em valor nominal de 1,00 p.u.

4.1.3. Variações de tensão de curta duração

Durante o período de medição foram evidenciados 30 distúrbios de tensão, sendo classificados como afundamentos temporários de tensão (7) ou afundamentos momentâneos de tensão (23), conforme mostrado na Tabela 18.

Tabela 18 – Variações de tensão de curta duração – Super Gringa.

| VARIACIONES DE TENSÃO DE CURTA DURACION | | | | | | |
|---|-------------|-------------|--------------|-------------|----------------|-------------|
| Fase | Elevaciones | | Afundamentos | | Interrupciones | |
| | Momentaneas | Temporarias | Momentaneos | Temporarios | Momentaneas | Temporarias |
| VaN | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 |
| VbN | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| VcN | 0 | 0 | 11 | 7 | 0 | 0 |

Fonte: O Autor, 2024.

De acordo com a Tabela 18 e com a Tabela 19, podemos observar a disposição dos eventos ocorridos por fase. Sendo assim, a fase A apresentou um total de 8 afundamentos de tensão, sendo todos classificados como afundamentos momentâneos. A fase B teve um total de 4 afundamentos de tensão, todos classificados como afundamentos momentâneos, sendo que nenhum evento dessa fase durou mais que um ciclo. Por fim, a fase C apresentou 18 afundamentos de tensão, sendo 11 afundamentos classificados como momentâneos e 7 afundamentos classificados como temporários. Vale lembrar que a fase C apresenta uma concentração de cargas muito maior que as fases A e B, sendo suscetível a mais distúrbios.

Para análise da magnitude da tensão durante os distúrbios, 220V é o valor de referência para 1 p.u. O caso mais crítico em relação a nível de tensão ocorreu na fase C, alcançando 136,4V durante 11 milissegundos. Levando em conta a duração do evento, o evento mais crítico ocorreu também na fase C com duração de 1:49:07 minutos, atingindo um valor de 0.89 p.u, ou 195,8V.

Tabela 19 – Classificação dos distúrbios – Super Gringa.

| Índice | Data | Hora | Amp. [p.u.] | Duração | Tipo | Fase | Reg. Sens. |
|--------|------------|--------------|-------------|-------------|------|------|------------|
| 1 | 23/04/2024 | 08:58:46.698 | 0,90 | 00:00:00.13 | AMT | Vcn | A |
| 2 | 23/04/2024 | 16:03:24.170 | 0,88 | 00:00:00.23 | AMT | Vcn | A |
| 3 | 23/04/2024 | 16:03:24.342 | 0,88 | 00:00:00.40 | AMT | Van | A |
| 4 | 23/04/2024 | 16:09:33.606 | 0,90 | 00:00:37.86 | ATT | Vcn | A |
| 5 | 23/04/2024 | 16:24:27.683 | 0,87 | 00:00:00.01 | AMT | Van | * |
| 6 | 23/04/2024 | 16:24:27.688 | 0,90 | 00:00:00.01 | AMT | Vbn | * |
| 7 | 23/04/2024 | 16:27:12.826 | 0,88 | 00:00:00.34 | AMT | Van | A |
| 8 | 23/04/2024 | 16:27:12.829 | 0,88 | 00:00:00.24 | AMT | Vcn | A |
| 9 | 26/04/2024 | 14:30:14.468 | 0,89 | 00:00:00.21 | AMT | Vcn | A |
| 10 | 26/04/2024 | 14:30:14.474 | 0,89 | 00:00:00.21 | AMT | Van | A |
| 11 | 27/04/2024 | 07:38:39.067 | 0,88 | 00:01:29.33 | ATT | Vcn | A |
| 12 | 27/04/2024 | 08:13:54.133 | 0,90 | 00:00:32.26 | ATT | Vcn | A |
| 13 | 27/04/2024 | 09:21:20.960 | 0,90 | 00:00:00.10 | AMT | Vcn | A |
| 14 | 27/04/2024 | 09:26:39.628 | 0,90 | 00:00:47.73 | ATT | Vcn | A |
| 15 | 27/04/2024 | 09:31:17.772 | 0,89 | 00:01:49.07 | ATT | Vcn | A |
| 16 | 27/04/2024 | 09:44:06.291 | 0,90 | 00:00:14.11 | ATT | Vcn | A |
| 17 | 27/04/2024 | 12:47:50.712 | 0,90 | 00:00:00.10 | AMT | Vcn | A |
| 18 | 27/04/2024 | 14:17:37.892 | 0,87 | 00:00:00.05 | AMT | Van | A |
| 19 | 27/04/2024 | 14:17:37.911 | 0,83 | 00:00:00.08 | AMT | Vcn | A |
| 20 | 29/04/2024 | 06:41:40.899 | 0,90 | 00:00:04.26 | ATT | Vcn | A |
| 21 | 29/04/2024 | 09:02:51.048 | 0,89 | 00:00:00.01 | AMT | Van | * |
| 22 | 29/04/2024 | 09:02:51.045 | 0,89 | 00:00:00.00 | AMT | Vbn | * |
| 23 | 29/04/2024 | 09:02:51.140 | 0,77 | 00:00:00.04 | AMT | Van | B |
| 24 | 29/04/2024 | 09:02:51.145 | 0,85 | 00:00:00.04 | AMT | Vbn | A |
| 25 | 29/04/2024 | 09:14:28.921 | 0,89 | 00:00:00.02 | AMT | Vcn | A |
| 26 | 29/04/2024 | 12:02:45.188 | 0,89 | 00:00:00.12 | AMT | Vcn | A |
| 27 | 29/04/2024 | 12:57:38.585 | 0,89 | 00:00:00.01 | AMT | Vbn | + |
| 28 | 29/04/2024 | 12:57:38.612 | 0,66 | 00:00:00.10 | AMT | Van | D |
| 29 | 29/04/2024 | 12:57:38.624 | 0,62 | 00:00:00.11 | AMT | Vcn | D |
| 30 | 29/04/2024 | 15:11:25.800 | 0,90 | 00:00:00.13 | AMT | Vcn | A |

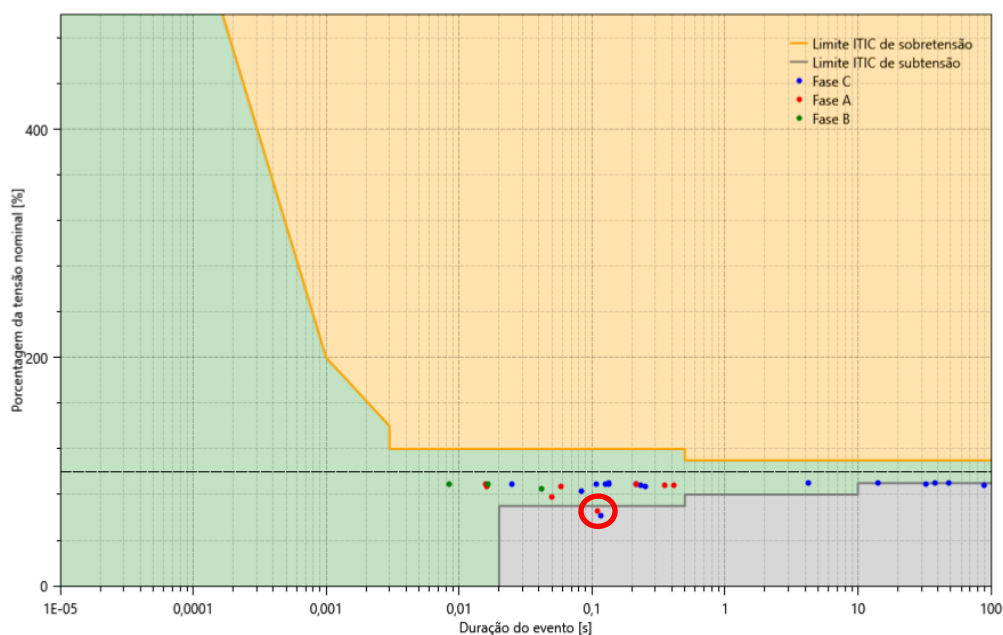
Fonte: O Autor, 2024.

A curva de vulnerabilidade de equipamentos (ITIC) demonstra os limites de tolerância de tensão de equipamentos eletrônicos. As regiões do gráfico indicam:

- Região cinza - Sujeito a mau funcionamento ou desligamento por afundamento de tensão;
- Região verde – Região de tolerância de tensão;
- Região laranja – Sujeito a danos aos equipamentos por elevação de tensão;

Com isso, a partir da análise desta curva, exposta na Figura 28, as fases A e C atingiram a região cinza do gráfico por um período de aproximadamente 0,1 segundos, podendo ocasionar o desligamento ou mau funcionamento de equipamentos e máquinas elétricas.

Figura 28 – Curva ITIC – Super Gringa.



Fonte: O Autor, 2024.

4.1.4. Análise de harmônicos

Para análise dos resultados de distorções harmônicas apresentados a seguir foi considerado como ordem harmônica máxima a 50ª harmônica. A Tabela 20 expõe os resultados dos cálculos dos indicadores de distorções harmônicas de tensão, considerando os limites para faixa de tensão igual ou inferior a 1 kV e utilizando o percentual de conformidade de 95%, ou seja, admitindo que os limites sejam extrapolados em 5% das amostras coletadas (1008 amostras).

Tabela 20 – Indicadores de distorção harmônica – Super Gringa.

| | Limite [%] | Va [%] | Vb [%] | Vc [%] |
|----------------|------------|--------|--------|--------|
| DTT95% | 10,0 | 3,09 | 2,86 | 2,64 |
| DTTp95% | 2,5 | 0,16 | 0,16 | 0,18 |
| DTTi95% | 7,5 | 2,96 | 2,66 | 2,40 |
| DTT395% | 6,5 | 1,15 | 1,25 | 1,39 |

Fonte: O Autor, 2024.

Baseando-se na análise dos resultados, constatou-se que nenhum dos indicadores excedeu o limite máximo estipulado pelo PRODIST - Módulo 8. No estabelecimento há a presença de máquinas com cargas não lineares como câmara fria, ar condicionado, máquinas de corte, fritadeira e forno elétrico. Apesar disso, os distúrbios harmônicos mantiveram-se

dentro dos limites permitidos. Também é importante destacar que os maiores valores de distorção correspondem à distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTTi95%). Isso ocorre devido aos tipos de cargas presentes na instalação do estabelecimento. Os baixos índices de distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTTp95%) mostram que há pouca interferência de componentes de tensão contínua no sistema, garantindo uma certa simetria na forma de onda da tensão.

Os indicadores totais que ilustram os valores médios e máximos alcançados com cada categoria de distorção harmônica são ilustrados na Tabela 21.

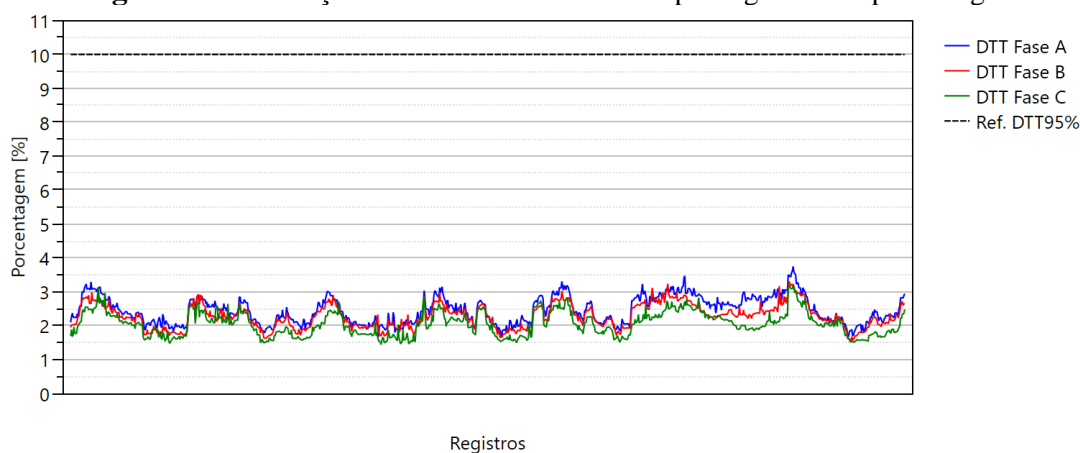
Tabela 21 – Valores máximos e médios de distorção harmônica – Super Gringa.

| Indicadores | | Va [%] | Vb [%] | Vc [%] |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| DTT% | Média | 2,45 | 2,27 | 2,05 |
| | Máximo | 3,74 | 3,29 | 3,20 |
| DTTp% | Média | 0,09 | 0,09 | 0,10 |
| | Máximo | 0,46 | 0,48 | 0,77 |
| DTTi% | Média | 2,30 | 2,09 | 1,81 |
| | Máximo | 3,56 | 2,97 | 2,88 |
| DTT3% | Média | 0,79 | 0,85 | 0,91 |
| | Máximo | 1,64 | 1,61 | 1,66 |

Fonte: O Autor, 2024.

Realizando o mapeamento de todos registros, conforme exposto na Figura 29, verifica-se que em nenhum momento ocorreram distorções que superaram o limite de 10% proposto pela norma em nenhuma das fases.

Figura 29 – Distorção harmônica total de tensão por registro – Super Gringa.



Fonte: O Autor, 2024.

4.1.5. Análise de flutuação de tensão (Flicker)

Após a realização das medidas, foram obtidos os seguintes parâmetros de flutuação de tensão, proporcionando uma compreensão mais abrangente sobre as variações na luminosidade e suas potenciais implicações para o efeito Flicker. Os resultados estão expostos na Tabela 22.

Tabela 22 – Indicadores de flutuação de tensão – Super Gringa.

| Indicadores | Va [p.u.] | Vb [p.u.] | Vc [p.u.] | Limite [p.u.] |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| Pst95% | 0,87 | 1,08 | 0,88 | 1,00 |
| Plt * | 0,73 | 0,48 | 0,74 | --- |

* Apresenta a última média registrada para Plt de cada fase

Fonte: O Autor, 2024.

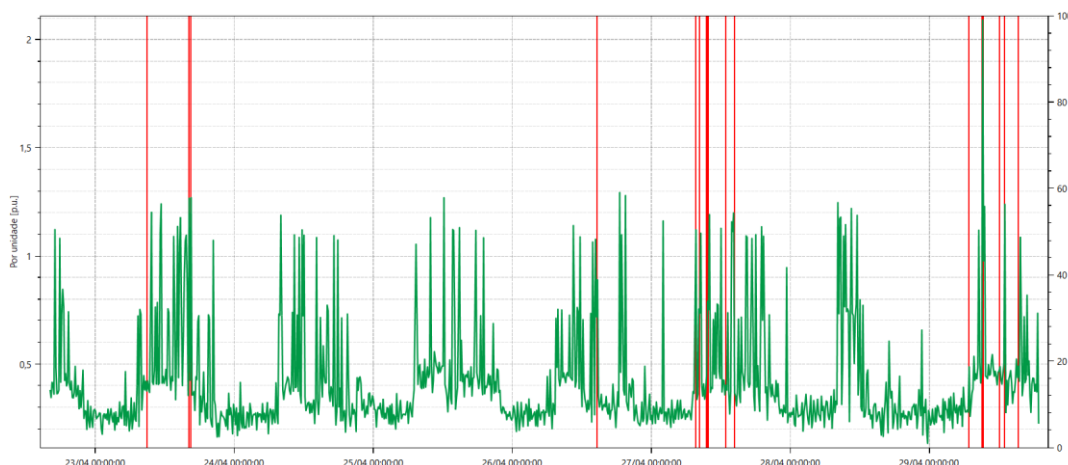
O indicador Pst95% representa o valor de severidade de flutuação de tensão de curta duração que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas. Nesse caso podemos observar que a fase B ultrapassou o limite estipulado pela ANEEL de 1,0 pu em 0,08 pu.

A Pst representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos. Da mesma forma, a Plt representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas (PRODIST, 2021).

Observando o comportamento da fase B no gráfico ilustrado na Figura 30 podemos observar que o nível de severidade de flutuação de tensão de curta duração ultrapassa o valor de 1.0 pu principalmente durante o horário que o estabelecimento está aberto. As linhas em vermelho representam os registros que foram excluídos por causa de algum distúrbio.

Nota-se que no dia 29/04 houve um pico no comportamento da Pst da fase B, ultrapassando o valor de 4.0 pu. Este valor acima do limite foi ocasionado pelos afundamentos de tensão e a falta de energia, uma vez que o registro condiz com dia e período em que foram registrados tais distúrbios no sistema em todas as fases.

Figura 30 – Comportamento da Pst fase B – Super Gringa.



Fonte: O Autor, 2024.

4.1.6. Análise do desequilíbrio de tensão

O resultado obtido durante as medições pode ser observado na Tabela 23, bem como o limite do indicador para análise de desequilíbrio de tensão. O valor limite para o FD95%, considerando-se tensão nominal abaixo de 1 kV, é de 3%, conforme Tabela 8.

Tabela 23 – Indicadores de desequilíbrio de tensão – Super Gringa.

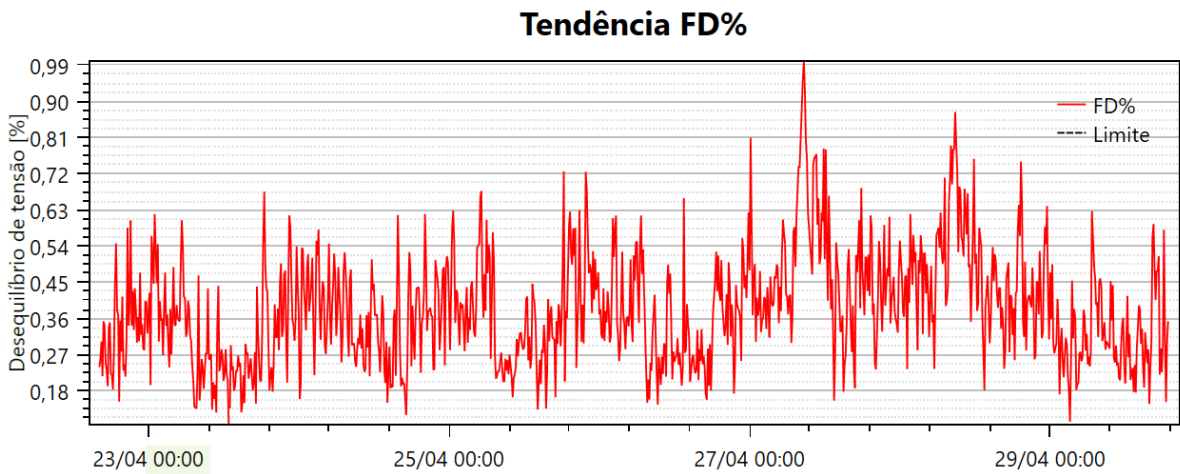
| Indicadores | | |
|-------------------------|--------|------|
| Limite de referência[%] | | 3,00 |
| | | [%] |
| FD% | Média | 0,38 |
| | Máximo | 1,00 |
| FD95% | | 0,62 |

Fonte: O Autor, 2024.

O indicador FD% representa o fator de desequilíbrio de tensão, enquanto o parâmetro FD95% representa o valor do indicador que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas. Nesse caso, obteve-se FD% médio de 0,38%, FD% máximo de 1,00% e FD95% de 0,62%.

Observando o gráfico disposto na Figura 31 podemos notar que o máximo valor de desequilíbrio ocorreu no dia 27/04, quando houve 8 afundamentos de tensão na fase C, conforme podemos observar na Tabela 19. Além disso, é visto que o nível de tensão da fase C no mesmo período estava em nível precário, abaixo da tensão da zona aceitável.

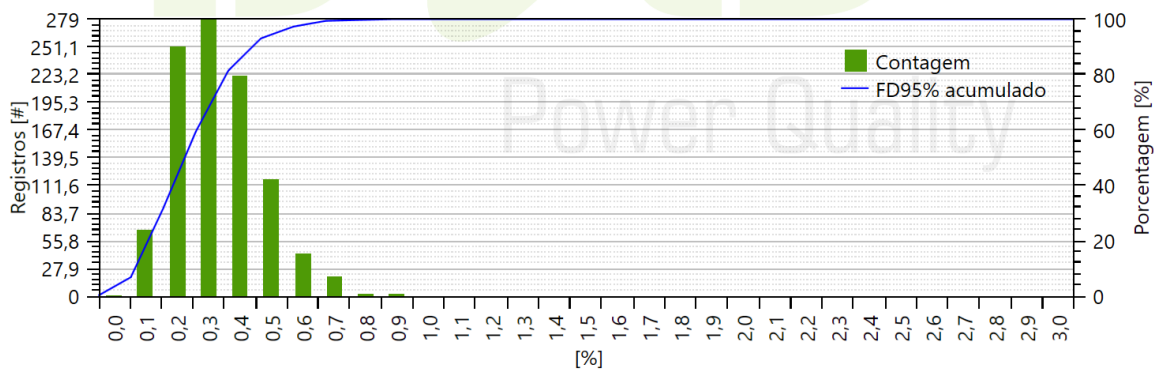
Figura 31 – Tendência de desequilíbrio de tensão – Super Gringa.



Fonte: O Autor, 2024.

A distribuição acumulada do indicador FD95% na Figura 32 mostra que a maioria dos registros teve uma taxa de desequilíbrio entre 0,2% e 0,4%, aproximando-se de uma distribuição F.

Figura 32 – Distribuição acumulada FD95% – Super Gringa.



Fonte: O Autor, 2024.

Logo, as definições de fator de desequilíbrio e de seus indicadores FD% e FD95% estão de acordo com a ANEEL PRODIST módulo 8, revisão 12.

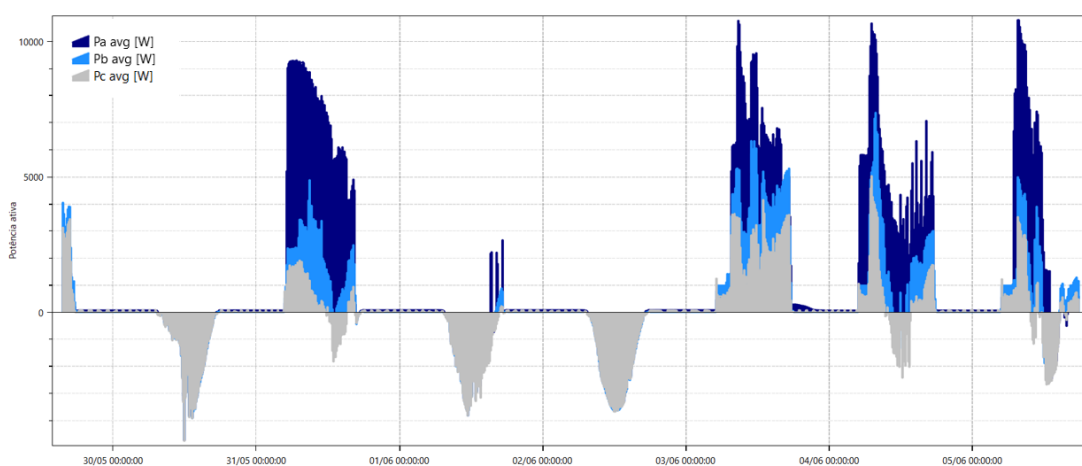
4.2. ANÁLISE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA MONTA BRASIL

4.2.1. Análise das curvas de carga

Para o segundo conjunto de medições foi escolhida uma instalação em uma empresa de fabricação de placas de circuito impresso. O estabelecimento conta com equipamentos e máquinas elétricas como máquina de impressão de máscara de solda, máquina de serigrafia automática, máquina de soldagem por refusão, forno elétrico e máquina de fresagem.

O gráfico das potências ativas das fases A, B e C é exposto na Figura 33. Pode ser notado que há um desequilíbrio considerável de cargas no sistema trifásico, uma vez que a fase A apresenta valores de potência muito maiores que as demais fases. Nesse caso o desequilíbrio não é tão acentuado quanto o caso anterior, apesar de ainda ser bastante evidente.

Figura 33 – Curvas de potência ativa por fase – Monta Brasil.



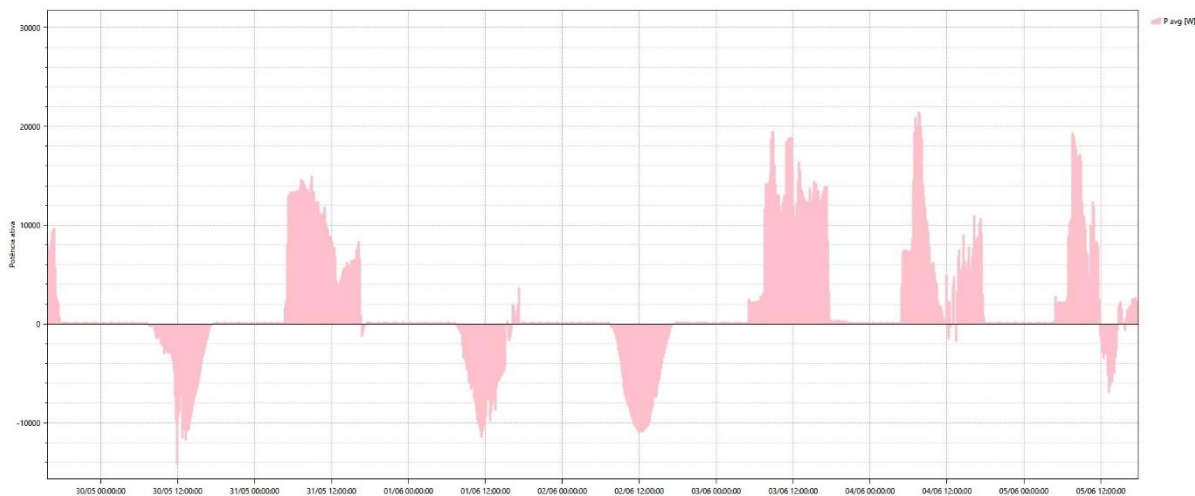
Fonte: O Autor, 2024.

Diferente da primeira unidade consumidora discutida no presente trabalho, a fábrica da Monta Brasil não tem necessidade de deixar seus equipamentos operando quando não há expediente. Sendo assim, à noite o consumo da UC vai praticamente a zero. Além disso, houve três dias no período de medição em que não houve expediente na fábrica, (feriado do dia 30/05/2024) e o final de semana entre os dias 01/06/2024 e 02/06/2024. Nesses períodos é possível ver como o sistema fotovoltaico se comporta quando a carga acionada no sistema é baixa, exportando praticamente toda energia produzida pelos módulos fotovoltaicos para rede.

Na Figura 34 podemos observar a potência total trifásica da UC. Durante o dia 30/05/2024 foi observado o pico de exportação por parte da UC, apresentando um pico de aproximadamente 15kW. Em contrapartida, o maior consumo observado ocorreu no dia 04/06/2024 às 7:30, sendo de um valor de aproximadamente 21kW.

Podemos notar que no dia 03/06 houve um dia com pouca irradiância, conforme observamos anteriormente na Figura 23, com isso ao longo do período de medição tivemos três situações distintas: Boa irradiância e UC operando (04/06/2024), pouca irradiância e UC não operando (noite), boa irradiância e UC não operando (02/06/2024) e pouca irradiância e UC operando (03/06/2024).

Figura 34 – Curvas de potência ativa total – Monta Brasil.



Fonte: O Autor, 2024.

4.2.2. Análise do comportamento do nível de tensão em regime permanente

A análise dos registros por faixa de tensão e seus respectivos indicadores, conforme apresentado na Tabela 24, revela resultados satisfatórios para as fases B e C, com a totalidade dos 1008 registros se situando dentro da faixa adequada. No entanto, na fase C foi identificada uma discrepância em relação ao parâmetro de nível de tensão fase-neutro.

Especificamente, a fase C apresentou 1 registro na faixa de nível de tensão precária, o que ocasionou um índice de 0,10% no indicador DRP. É importante destacar que, apesar dessa ocorrência, nenhum registro foi encontrado na faixa crítica, demonstrando um bom desempenho geral da fase C e das demais fases quanto à qualidade da tensão fase-neutro.

Tabela 24 – Indicadores de nível de tensão em regime permanente – Monta Brasil.

| Registros por faixa | | | | Indicadores | | |
|---------------------|----------|----------|---------|-------------|-----------|------------|
| Fase | Adequado | Precário | Crítico | | Valor [%] | Limite [%] |
| VaN | 1007 | 1 | 0 | DRP | 0,10 | 3,00 |
| VbN | 1008 | 0 | 0 | DRC | 0,00 | 0,50 |
| VcN | 1008 | 0 | 0 | | | |

Fonte: O Autor, 2024.

Em relação aos valores mínimos e máximos para tensão fase-neutro, estão expostos na Tabela 25. Nota-se que houve uma única desconformidade quanto ao parâmetro de nível de tensão fase-neutro na fase A durante as 1008 medições, atingindo o valor de 232,83V no dia

30/05/2024 às 12:00. Esse valor está na faixa precária de tensão, conforme exigido pelo PRODIST na Tabela 11.

Tabela 25 – Valores mínimos e máximos de tensão fase-neutro em regime permanente – Monta Brasil.

| Mínimos | | | |
|----------------|-----------|------------|------------------|
| Fase | Valor [V] | Data | Hora |
| VaN | 205,34 | 03/06/2024 | 08:50:00.1490000 |
| VbN | 213,98 | 05/06/2024 | 15:10:00.1310000 |
| VcN | 211,63 | 04/06/2024 | 22:10:00.1610000 |
| Máximos | | | |
| Fase | Valor [V] | Data | Hora |
| VaN | 232,83 | 30/05/2024 | 12:00:00.1990000 |
| VbN | 230,05 | 31/05/2024 | 13:00:00.1430000 |
| VcN | 227,91 | 30/05/2024 | 12:00:00.1990000 |

Fonte: O Autor, 2024.

Os valores mínimos e máximos para tensão de linha estão expostos na Tabela 26. Nota-se que houve ao menos uma desconformidade quanto ao parâmetro de nível de tensão de linha Uab durante as 1008 medições, atingindo o valor máximo de 401,84V no dia 30/05/2024 às 12:00. Esse valor está na faixa precária de tensão, conforme definido pelo PRODIST na Tabela 11. Além disso, houve mais um registro precário de tensão de linha Uab, também no dia 30/05/2024, às 11:50 obteve-se o valor de 399,82V.

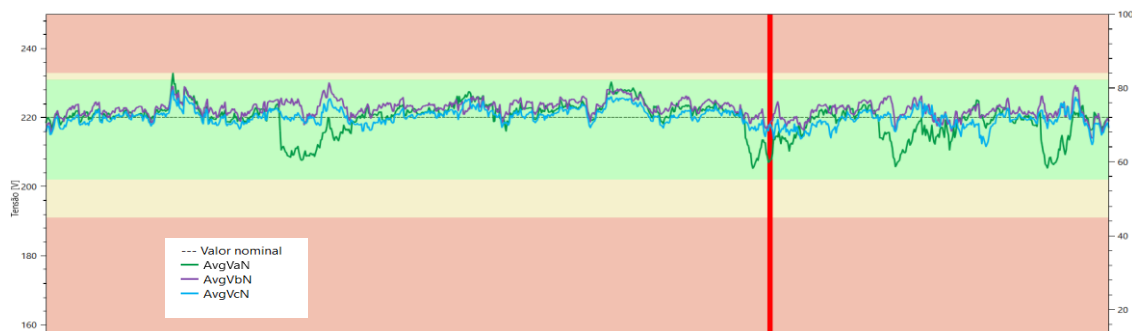
Tabela 26 – Valores mínimos e máximos de tensão de linha em regime permanente – Monta Brasil.

| Mínimos | | | |
|----------------|-----------|------------|------------------|
| Linha | Valor [V] | Data | Hora |
| Uab | 367,13 | 04/06/2024 | 07:40:00.1970000 |
| Ubc | 368,84 | 04/06/2024 | 07:40:00.1970000 |
| Uca | 368,50 | 04/06/2024 | 07:40:00.1970000 |
| Máximos | | | |
| Linha | Valor [V] | Data | Hora |
| Uab | 401,84 | 30/05/2024 | 12:00:00.1990000 |
| Ubc | 395,88 | 30/05/2024 | 12:00:00.1990000 |
| Uca | 396,92 | 30/05/2024 | 12:00:00.1990000 |

Fonte: O Autor, 2024.

Na Figura 35 podemos observar o comportamento do nível de tensão durante todo o período de medição. As linhas verticais em vermelho representam os distúrbios de tensão que ocorreram durante a medição, invalidando os registros para análise nesse caso.

Figura 35 – Nível de tensão de fase durante as medições – Monta Brasil.

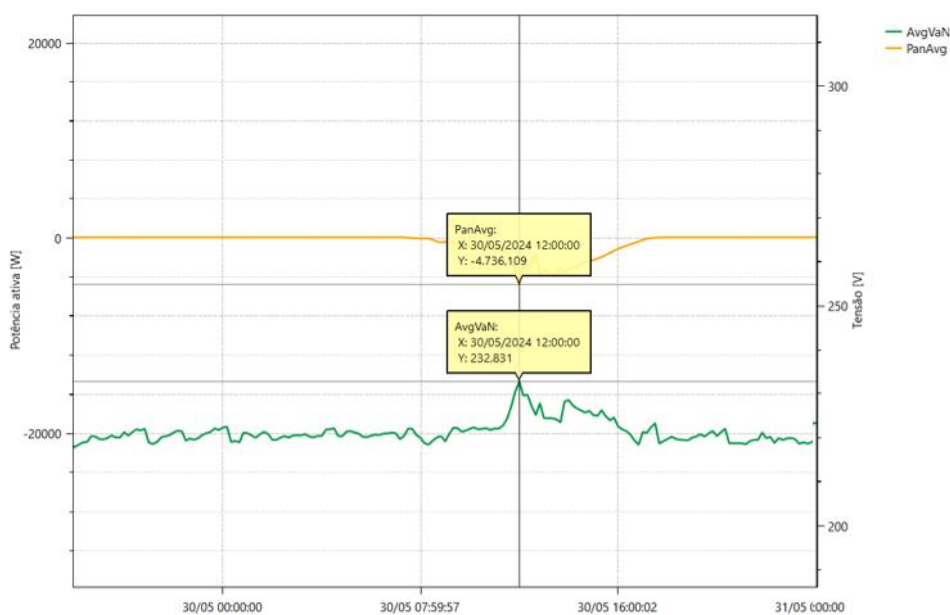


Fonte: O Autor, 2024.

Percebe-se que o valor máximo de tensão de fase da fase A ocorreu no dia 30/05/24, um dia com irradiância substancial como pode ser visto pela quantidade de potência ativa exportada para a rede na Figura 23. Além disso, nesse dia foi feriado de Corpus Christi, sendo assim a empresa não estava em horário de operação e praticamente toda energia gerada foi exportada.

De posse dessas informações podemos dizer que conforme o dia foi amanhecendo no dia 30/04/2024 o nível de tensão medido foi subindo nas 3 fases, caracterizando a atuação do inversor fotovoltaico. Observando a Figura 36 nota-se que a sobretensão ocorreu no momento em que a fase A teve seu máximo de exportação de potência ativa para a rede, 4.736,11W.

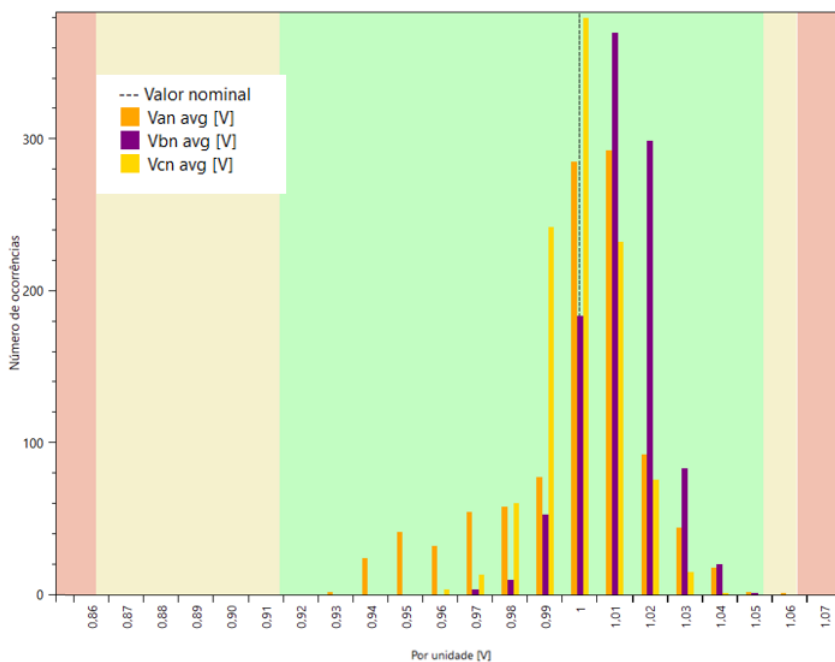
Figura 36 – Comparação do nível de tensão e potência ativa da fase A dia 30/05 – Monta Brasil.



Fonte: O Autor, 2024.

Analisando o histograma de tensões durante todo o período de medição, exposto na Figura 37 pode-se quantificar o número de ocorrência de acordo com o patamar de tensão alcançado.

Figura 37 – Histograma das tensões durante período de medição.



Fonte: O Autor, 2024.

Podemos observar que as tensões de fase-neutro das fases A e C possuem comportamentos semelhantes, com medições centradas no meio do histograma. Já a fase B apresenta um deslocamento da concentração de barras para valores maiores que 1,00 p.u.

4.2.3. Variações de tensão de curta duração

Durante o período de medição foram evidenciados 28 distúrbios de tensão, sendo classificados como afundamentos temporários de tensão (19) ou afundamentos momentâneos de tensão (9), conforme mostrado na Tabela 27.

Tabela 27 – Variações de tensão de curta duração – Monta Brasil.

| Fase | Elevações | | Afundamentos | | Interrupções | |
|------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | Momentâneas | Temporárias | Momentâneos | Temporários | Momentâneas | Temporárias |
| VaN | 0 | 0 | 9 | 19 | 0 | 0 |
| VbN | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VcN | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: O Autor, 2024.

De acordo com a Tabela 27 e com a Tabela 28 ocorridos por fase. Sendo assim, a fase A apresentou todos os 28 afundamentos de tensão, sendo 9 classificados como afundamentos momentâneos e 19 classificados como afundamentos temporários. Demais fases não apresentaram distúrbios de tensão durante o período de medição. Novamente, a fase que apresenta uma maior concentração de cargas também apresenta mais distúrbios que as demais fases, sendo mais suscetível a distúrbios.

Tabela 28 – Classificação dos distúrbios – Monta Brasil.

| Índice | Data | Hora | Amp. [p.u.] | Duração | Tipo | Fase |
|--------|------------|--------------|-------------|-------------|------|------|
| 1 | 31/05/2024 | 08:52:46.490 | 0,90 | 00:00:00.02 | AMT | Van |
| 2 | 03/06/2024 | 09:16:59.841 | 0,90 | 00:00:00.03 | AMT | Van |
| 3 | 03/06/2024 | 11:14:07.205 | 0,88 | 00:00:14.16 | ATT | Van |
| 4 | 03/06/2024 | 11:14:47.322 | 0,87 | 00:00:07.58 | ATT | Van |
| 5 | 03/06/2024 | 11:15:34.095 | 0,88 | 00:00:06.77 | ATT | Van |
| 6 | 03/06/2024 | 11:16:25.761 | 0,89 | 00:00:06.44 | ATT | Van |
| 7 | 03/06/2024 | 11:17:23.341 | 0,88 | 00:00:06.78 | ATT | Van |
| 8 | 03/06/2024 | 11:18:30.187 | 0,88 | 00:00:06.88 | ATT | Van |
| 9 | 03/06/2024 | 11:19:46.353 | 0,88 | 00:00:07.27 | ATT | Van |
| 10 | 03/06/2024 | 11:21:12.490 | 0,88 | 00:00:06.36 | ATT | Van |
| 11 | 03/06/2024 | 11:22:46.247 | 0,88 | 00:00:06.10 | ATT | Van |
| 12 | 03/06/2024 | 11:24:29.490 | 0,88 | 00:00:05.48 | ATT | Van |
| 13 | 03/06/2024 | 11:26:24.564 | 0,89 | 00:00:06.28 | ATT | Van |
| 14 | 03/06/2024 | 11:28:42.065 | 0,89 | 00:00:05.78 | ATT | Van |
| 15 | 03/06/2024 | 11:31:17.473 | 0,89 | 00:00:06.44 | ATT | Van |
| 16 | 03/06/2024 | 11:34:26.063 | 0,88 | 00:00:06.18 | ATT | Van |
| 17 | 03/06/2024 | 11:37:59.046 | 0,88 | 00:00:06.78 | ATT | Van |
| 18 | 03/06/2024 | 11:42:15.117 | 0,89 | 00:00:06.53 | ATT | Van |
| 19 | 03/06/2024 | 11:46:50.311 | 0,88 | 00:00:05.94 | ATT | Van |
| 20 | 03/06/2024 | 11:51:16.291 | 0,88 | 00:00:05.94 | ATT | Van |
| 21 | 03/06/2024 | 11:55:54.782 | 0,88 | 00:00:06.30 | ATT | Van |
| 22 | 03/06/2024 | 23:54:59.890 | 0,88 | 00:00:00.00 | AMT | Van |
| 23 | 04/06/2024 | 06:52:45.419 | 0,89 | 00:00:00.69 | AMT | Van |
| 24 | 04/06/2024 | 07:14:43.493 | 0,89 | 00:00:00.03 | AMT | Van |
| 25 | 04/06/2024 | 07:24:12.195 | 0,90 | 00:00:00.02 | AMT | Van |
| 26 | 04/06/2024 | 07:54:10.632 | 0,89 | 00:00:00.04 | AMT | Van |
| 27 | 05/06/2024 | 07:13:44.797 | 0,90 | 00:00:00.03 | AMT | Van |
| 28 | 05/06/2024 | 07:44:09.823 | 0,89 | 00:00:00.04 | AMT | Van |

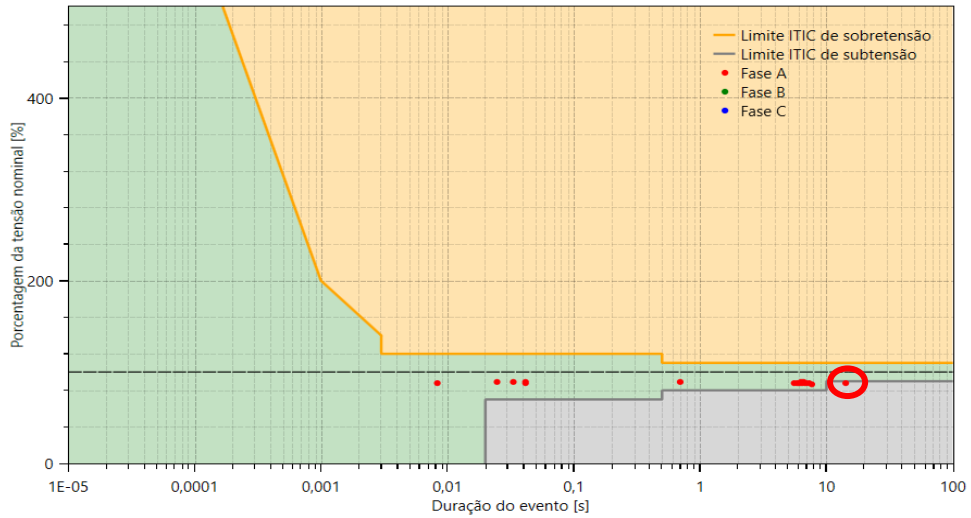
Fonte: O Autor, 2024.

Analisando a magnitude da tensão durante os distúrbios, sendo novamente 220V o valor de referência para 1 p.u. A maioria dos eventos ocorreu entre o dia 03/06/2024 e 04/06/2024, quando houve chuva e o menor nível de irradiação solar, conforme apresentado na Figura 23.

A análise da curva de vulnerabilidade de equipamentos (ITIC), exposta na

Figura 38, mostra que apenas em um registro de afundamento de tensão da fase A atingiu a região cinza do gráfico por um período de aproximadamente 10 segundos. Esse ponto está no limiar entre a região amarela e a região cinza.

Figura 38 – Curva ITIC – Monta Brasil.



Fonte: O Autor, 2024.

4.2.4. Análise de harmônicos

A análise dos resultados de distorção harmônica foi realizada da mesma forma como anteriormente, considerando a ordem harmônica máxima a 50ª harmônica. Pela característica do padrão de consumo da UC, podemos observar as distorções causadas majoritariamente pelo inversor fotovoltaico, uma vez que a fábrica não estava funcionando nos dias 30/05/2024, 01/06/2024 e 02/06/2024, fazendo com que não houvesse consumo, apenas geração por parte da UC.

A Tabela 29 expõe os resultados dos cálculos dos indicadores de distorções harmônicas de tensão, considerando os limites para faixa de tensão igual ou inferior a 1 kV e utilizando o percentual de conformidade de 95%, ou seja, admitindo que os limites sejam extrapolados em 5% das amostras coletadas (1008 amostras).

Tabela 29– Indicadores de distorção harmônica – Monta Brasil.

| | Limite [%] | Va [%] | Vb [%] | Vc [%] |
|----------------|------------|--------|--------|--------|
| DTT95% | 10,0 | 4,97 | 4,19 | 4,53 |
| DTTp95% | 2,5 | 0,30 | 0,64 | 0,14 |
| DTTi95% | 7,5 | 3,86 | 3,34 | 3,65 |
| DTT395% | 6,5 | 3,79 | 2,82 | 3,13 |

Fonte: O Autor, 2024.

Baseando-se na análise dos resultados, constatou-se que nenhum dos indicadores excedeu o limite máximo estipulado pelo PRODIST - Módulo 8. A Montagem Brasil conta com máquinas com cargas não lineares como cortadora de painéis, máquinas CNC, forno de fusão e máquina de teste de alta tensão. Apesar disso, os distúrbios harmônicos mantiveram-se dentro dos limites permitidos.

Destaca-se que os maiores valores de distorção correspondem à distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT395%). Isso é causado principalmente devido às cargas não lineares presentes na fábrica. Correntes de terceira harmônica no sistema trifásico não são eliminadas no condutor neutro e, nesta situação, o condutor neutro consumirá uma corrente cumulativa de terceira harmônica que é perigosa porque pode levar ao mau funcionamento de aparelhos elétricos e proteção de sistemas. Com o superaquecimento, o resultado são as perdas por sobrecarga, deterioração de isolamento do condutor neutro, ou deformação do condutor devido ao aumento da temperatura.

Também se destaca, novamente, os valores de distorção que correspondem à distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTTi95%). Percebe-se que esse indicador obteve valores relativamente altos.

Os indicadores totais que ilustram os valores médios e máximos alcançados com cada categoria de distorção harmônica são ilustrados na Tabela 30.

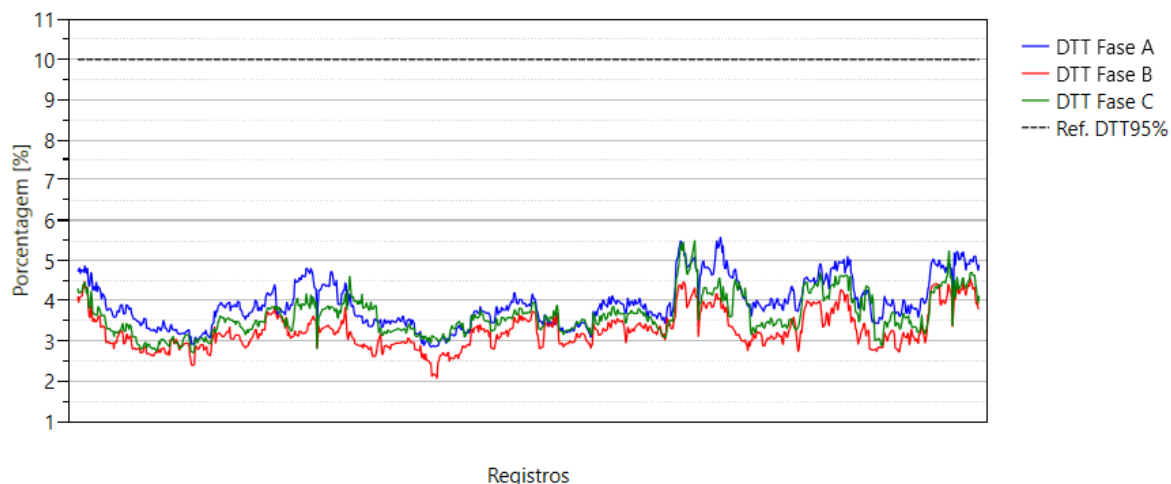
Tabela 30 – Indicadores totais de distorção harmônica – Montagem Brasil.

| Indicadores | | Va [%] | Vb [%] | Vc [%] |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| DTT% | Média | 3,93 | 3,26 | 3,63 |
| | Máximo | 5,58 | 4,56 | 5,50 |
| DTTp% | Média | 0,22 | 0,56 | 0,11 |
| | Máximo | 0,36 | 0,68 | 0,19 |
| DTTi% | Média | 3,28 | 2,81 | 3,16 |
| | Máximo | 4,25 | 3,78 | 4,19 |
| DTT3% | Média | 2,01 | 1,45 | 1,68 |
| | Máximo | 4,33 | 3,16 | 3,92 |

Fonte: O Autor, 2024.

Realizando o mapeamento de todos os registros, conforme exposto na Figura 39, verifica-se que em nenhum momento ocorreram distorções que superaram o limite de 10% proposto pela norma em nenhuma das fases. Nota-se que os níveis de DTT obtidos na Montagem Brasil são em geral maiores do que os níveis de DTT da medição no mercado Super Gringa.

Figura 39 – Distorção harmônica total de tensão por registro – Monta Brasil.



Fonte: O Autor, 2024.

4.2.5. Análise de flutuação de tensão (Flicker)

Após repetir o procedimento de análise para efeito Flicker, foram determinados os seguintes parâmetros de flutuação de tensão apresentados na Tabela 31 para a empresa Monta Brasil.

Tabela 31 – Indicadores de flutuação de tensão – Monta Brasil.

| Indicadores | | | | |
|---------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| | Va [p.u.] | Vb [p.u.] | Vc [p.u.] | Limite [p.u.] |
| Pst95% | 1,33 | 1,28 | 1,04 | 1,00 |
| Plt * | 0,72 | 0,48 | 0,64 | --- |

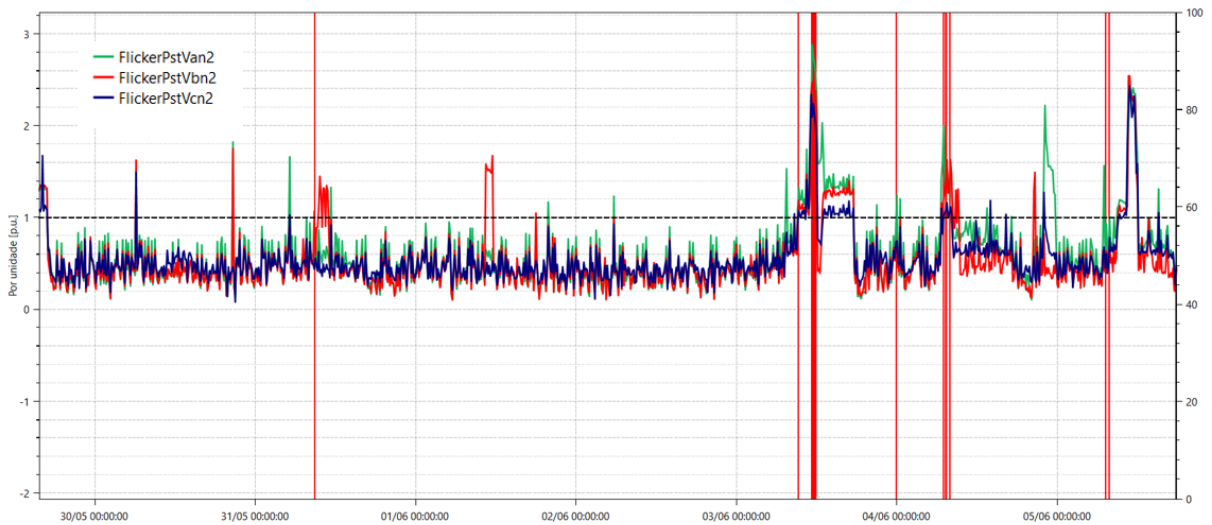
* Apresenta a última média registrada para Plt de cada fase

Fonte: O Autor, 2024.

Novamente, analisando o indicador Pst95% podemos observar que as 3 fases Va, Vb e Vc ultrapassaram o limite de 1,00p.u estipulado pela ANEEL em 0,33p.u, 0,28p.u e 0,04p.u respectivamente.

Observando o comportamento das 3 fases no gráfico ilustrado na Figura 40 podemos observar que o nível de severidade de flutuação de tensão de curta duração ultrapassa o valor de 1.0 pu, o limite estabelecido pela norma, especialmente quando foi evidenciada a presença de distúrbios de tensão nas medições realizadas em um dia de chuva, 03/06/2024.

Figura 40 – Comportamento Pst das 3 fases – Monta Brasil.



Fonte: O Autor, 2024.

Podemos afirmar que tanto no conjunto de medidas anterior como nesse houve aumento do nível de severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) após serem registrados afundamentos de tensão.

4.2.6. Análise do desequilíbrio de tensão

O resultado obtido durante as medições pode ser observado na Tabela 32 bem como o limite do indicador para análise de desequilíbrio de tensão. Novamente, o valor limite para o FD95% é de 3% pois a instalação conta com tensão nominal abaixo de 1 kV. Para esse caso, obteve-se FD% médio de 0,51%, FD% máximo de 1,16% e FD95% de 0,78%.

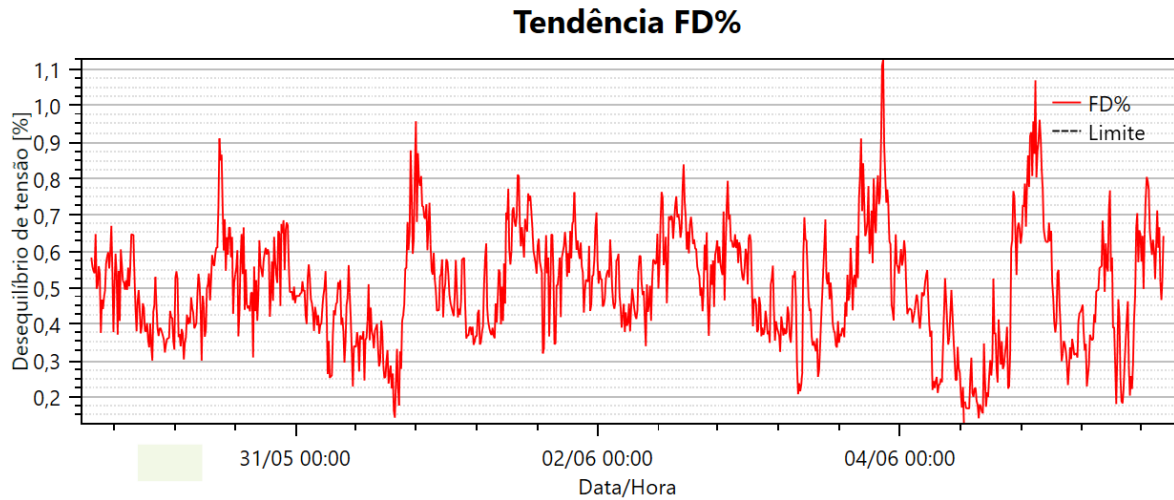
Tabela 32 – Indicadores de desequilíbrio de tensão – Monta Brasil.

| Indicadores | | 3,00 |
|--------------------------------|--------|------------|
| Limite de referência[%] | | [%] |
| FD% | Média | 0,51 |
| | Máximo | 1,16 |
| FD95% | | 0,78 |

Fonte: O Autor, 2024.

Observando o gráfico disposto na Figura 41 podemos notar que o máximo valor de desequilíbrio ocorreu no dia 03/06, quando atingiu o valor de 1,16%. Nesse mesmo dia foram evidenciados 21 afundamentos de tensão na fase A, conforme foi visto na Tabela 28.

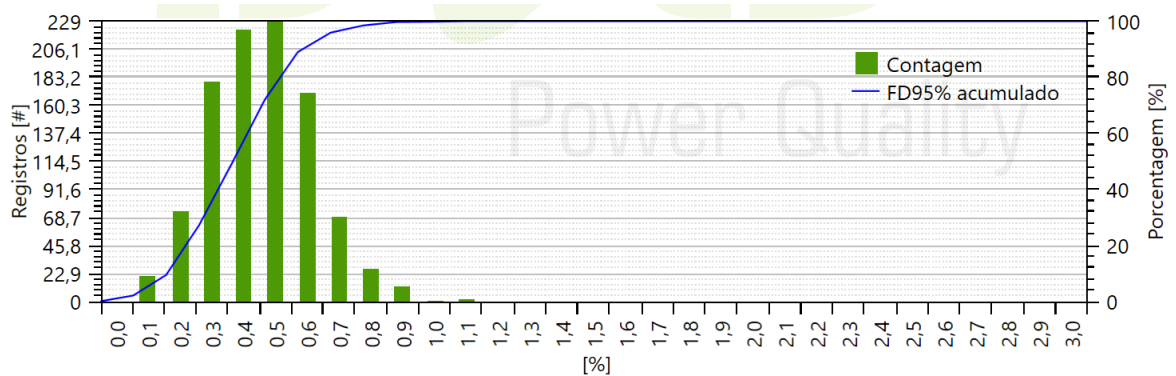
Figura 41 – Tendência de desequilíbrio de tensão – Monta Brasil.



Fonte: O Autor, 2024.

A distribuição acumulada do indicador FD95% na Figura 42 mostra que a maioria dos registros teve uma taxa de desequilíbrio entre 0,3% e 0,6%, aproximando-se de uma distribuição normal.

Figura 42 – Distribuição acumulada FD95% – Monta Brasil.



Fonte: O Autor, 2024.

Logo, as definições de fator de desequilíbrio e de seus indicadores FD% e FD95% estão de acordo com a ANEEL PRODIST módulo 8, revisão 12.

5. CONCLUSÃO

É inegável que o crescimento da geração distribuída no território nacional tem sido notório, refletindo uma tendência significativa e crescente no setor energético. A geração distribuída, que se caracteriza pela produção de energia elétrica em instalações situadas próximas ao ponto de consumo, representa uma mudança fundamental em relação à geração centralizada tradicional, que ocorre em grandes usinas localizadas a distâncias consideráveis dos centros de consumo. Esse modelo de geração distribuída não apenas promove uma maior eficiência ao reduzir as perdas associadas ao transporte de energia elétrica, mas também oferece novas oportunidades para a integração de fontes renováveis, como os painéis fotovoltaicos. A possibilidade de exportação de energia gerada por unidades consumidoras (UCs) para a rede elétrica é uma das vantagens notáveis dessa abordagem. Quando uma UC gera mais energia do que consome, o excedente pode ser enviado para a rede, contribuindo para a oferta geral de eletricidade e possibilitando que o consumidor receba compensações financeiras ou créditos.

No entanto, para que essa forma inovadora de negócio continue a crescer e prosperar, é essencial que o país desenvolva e adapte sua infraestrutura de maneira adequada. A expansão da geração distribuída requer investimentos em redes elétricas inteligentes, que possam gerenciar de forma eficiente a entrada e o fluxo de energia proveniente de múltiplas fontes distribuídas.

Para o presente trabalho o estudo de campo teve como objetivo ver de maneira prática os conceitos abordados em relação a qualidade de energia elétrica em duas unidades consumidoras com diferentes perfis de carga. A análise comparativa entre o mercado Super Gringa e a fábrica Monta Brasil revela diferenças significativas nas características de consumo e no impacto sobre a qualidade da energia. Esses contrastes são evidentes em várias áreas cruciais, incluindo o comportamento das curvas de carga, o nível de tensão, as variações de tensão de curta duração, a flutuação de tensão e o desequilíbrio de tensão.

No que diz respeito às curvas de carga, o mercado Super Gringa apresenta um padrão operacional que se estende por todo o dia, com cargas contínuas, principalmente devido ao uso de câmaras frias e freezers. Durante a noite, as fases A e B mantêm uma potência ativa estável, enquanto a fase C demonstra um comportamento mais intermitente com picos de consumo, especialmente no início do dia. Em contraste, a fábrica Monta Brasil tem um consumo de energia que cai praticamente a zero fora do expediente, refletindo uma operação mais controlada e menos suscetível a picos de carga, o que contribui para uma maior estabilidade no comportamento de carga.

A análise do nível de tensão em regime permanente mostra que o mercado Super Gringa teve três registros de tensão precária, resultando em um indicador DRP de 0,30%. Isso contrasta com a fábrica Monta Brasil, que teve apenas um registro na faixa de tensão precária, refletido em um DRP de 0,10%. Ambos os locais atendem aos critérios do PRODIST, mas a fábrica Monta Brasil demonstrou um desempenho superior, com uma menor incidência de tensão precária.

Quanto às variações de tensão de curta duração, o mercado Super Gringa apresentou um total de 30 distúrbios, com uma predominância de afundamentos momentâneos. Por outro lado, a fábrica Monta Brasil registrou 28 distúrbios, com uma distribuição mais equilibrada entre afundamentos temporários e momentâneos. Embora ambos os cenários mostrem variações, a fábrica Monta Brasil mostrou um melhor desempenho do ponto de vista dos distúrbios de tensão.

A análise de flutuação de tensão, ou Flicker, revelou que a tensão da fase B do mercado Super Gringa ultrapassou o limite da ANEEL em 0,08 pu. Na fábrica Monta Brasil, todas as fases excederam o limite, com as tensões Va e Vb apresentando ultrapassagens mais significativas. Esse resultado indica que, enquanto o mercado Super Gringa tem um desempenho razoável em relação ao Flicker, a fábrica Monta Brasil enfrenta desafios maiores na gestão da flutuação de tensão, muito devido ao padrão de cargas presentes nessa UC.

Finalmente, no que diz respeito ao desequilíbrio de tensão, o mercado Super Gringa obteve um fator de desequilíbrio médio de 0,38%, com um máximo de 1,00% e percentil 95% em 0,62%. A fábrica Monta Brasil, embora dentro dos limites do PRODIST, teve um desempenho ligeiramente inferior com um fator médio de 0,51%, máximo de 1,16% e percentil 95% em 0,78%. Esses resultados indicam um desequilíbrio mais pronunciado na fábrica Monta Brasil, possivelmente devido à sua localização em um distrito industrial.

Indicadores de harmônicos em geral obtiveram resultados menores durante as medições no mercado Super Gringa em relação à fábrica Monta Brasil. Um fator importante para isso pode ser o fato da fábrica estar em um distrito industrial, sendo mais suscetível à interferência de harmônicas de outras unidades consumidoras. Em geral, ambas as unidades consumidoras obtiveram bons resultados nos indicadores referentes a harmônicos.

Por fim, é evidente que as vantagens que justificam o uso e investimento nesta tecnologia superam as possíveis desvantagens que ela pode apresentar para o sistema elétrico. Dessa forma, levando em conta as análises realizadas nas duas unidades consumidoras, expondo

condições climáticas e variações diversas, pode-se afirmar que a operação desse sistema em sua capacidade nominal não compromete a qualidade da energia elétrica da instalação. O fornecimento de energia atende aos padrões de qualidade estabelecidos pelas normas vigentes.

6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A corrente de fuga é um fenômeno causado pela presença de tensão de modo comum não constante nos terminais das *strings* fotovoltaicas, além da presença de fatores intrínsecos aos módulos fotovoltaicos, como a capacitância parasita entre os componentes dos módulos e suas molduras metálicas. Para um futuro trabalho, seria interessante realizar esse tipo de análise para um trabalho que relacione inversores de frequência fotovoltaicos.

7. ANEXO A

```
--> // Parâmetros da modulação SPWM
frecuencia_modulacao = 2000; // Frequência de modulação SPWM (Hz)
amplitude_tensao = 220; // Amplitude da tensão de saída (V)
duty_cycle = 0.5; // Ciclo de trabalho (50%)

// Parâmetros de tempo e vetor de tempo
tempo_simulacao = 0.0050; // Tempo de simulação (segundos)
tempo = linspace(0, tempo_simulacao, 1000); // Vetor de tempo
theta = 2 * %pi * frecuencia_modulacao * tempo; // Ângulo de modulação SPWM

// Sinais de modulação SPWM para as três fases
SPWM_A = 0.5 + 0.5 * sin(theta); // Sinal SPWM para fase A
SPWM_B = 0.5 + 0.5 * sin(theta - 2*%pi/3); // Sinal SPWM para fase B
SPWM_C = 0.5 + 0.5 * sin(theta - 4*%pi/3); // Sinal SPWM para fase C

// Tensões de saída para as três fases
V_A = amplitude_tensao * SPWM_A; // Tensão de saída fase A
V_B = amplitude_tensao * SPWM_B; // Tensão de saída fase B
V_C = amplitude_tensao * SPWM_C; // Tensão de saída fase C

// Plot das tensões das três fases em gráficos separados
figure(1);
plot(tempo, V_A, 'b', 'LineWidth', 1.5);
grid on;
title('Saída de Tensão - Fase A');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensão (V)');
figure(2);
plot(tempo, V_B, 'r', 'LineWidth', 1.5);
grid on;
title('Saída de Tensão - Fase B');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensão (V)');
figure(3);
plot(tempo, V_C, 'g', 'LineWidth', 1.5);
grid on;
title('Saída de Tensão - Fase C');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensão (V)');
```

8. REFERÊNCIAS

ANALISE DA DEGRADAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS ANALYSIS OF THE DEGRADATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES Keyla Cardoso - Acesso em: 09 abril. 2024.

ANEEL. Caderno temático Micro e Minigeração Distribuída - 2 edição.

BIOELETRICIDADE COM BIOMASSA DA CANA - https://unicadata.com.br/download_media.php?idM=14876289 -Acesso em 23 de abril de 2024.

Bose, B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall, 2001.

COGEN. Geração Distribuída – Novo Ciclo de Desenvolvimento. 2013. Disponível em: http://www.cogen.com.br/workshop/2013/Geracao_Distribuida_Calabro_22052013.pdf. Acesso em: 13 abril 2024

CSR Energia Solar. Disponível em: <https://csrenergiasolar.com.br/2023/12/11/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-sfcr-on-grid/> . Acessado em 19 de abril de 2024.

DUGAN, R. C.;.com.br/wp-content/uploads/2013/09/ed-90_Fasciculo_Cap-VII-Qualidade-de-energia.pdf. Acesso em: 01 de abril de 2024.

Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 22 abril 2024

ENERGIA SOLAR - BENEFÍCIOS NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. ALMEIDA, Carlos Rafael Ribeiro de Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva – FAIT SOARES, Larissa Ribas de Lima Mestre em Eng. Mecânica, docente na Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva - FAIT

FORTES, R. R. A. Propagação de harmônicas produzidas por inversores fotovoltaicos e transformadores assimetricamente magnetizados na geração distribuída. 203 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2018. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/180210>>. Acesso em: 26 de abril de 2024.

Google Maps. Rua João Maria da Fonseca, 755 - Passo das Pedras, Gravataí - RS, 94035-190. Disponível em:

<https://www.google.com.br/maps/place/R.+Jo%C3%A3o+Maria+da+Fonseca,+755+-+Passo+das+Pedras,+Gravata%C3%AD++RS,+94035-190/@-29.9443394,-51.0010521,45m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x95190b383323ab6f:0x3579d72584fff172!8m2!3d-29.9444437!4d-51.0010596!16s%2Fg%2F11cr_0vww0!5m1!1e4?entry=ttu>. Acesso em: 16 jul. 2024.

Hanzelka, Z. and Bien, A. (2006). Voltage Disturbances - Flicker Disponível em: https://www.eletrica.ufpr.br/p/_media/professores:mateus:te274_-_flutuacao_de_tensao. Acesso em: 01 de abril de 2024.

IMS. Analisador Portátil de Energia: PowerNET P-600 G4. 2015 Disponível em: <<https://www.ims.ind.br/analisadores-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 07 maio. 2024.

IMS. Catálogo de Produtos: PowerMANAGER Desktop PRO. Rio Grande do sul: IMS, 2024.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Dados históricos. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 16 jul. 2024.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. Eletrônica de potência: Introdução ao estudo dos conversores CC-CA: Florianópolis, 2005.

Ministério de Minas e Energia (MME). Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (PROGD). Brasília, 2017. Disponível no site: www.mme.gov.br. Acesso em: 13 de abril de 2024.

Ministério de Minas e Energia (MME). Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica. Disponível em: <https://antigo.mme.gov.br/documents/20182/6dac9bf7-78c7-ff43-1f03-8a7322476a08> Acesso em: 01 de maio de 2024.

Nota técnica - https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/audiencias-publicas-antigas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_ideDocumento=20569&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseRe

uniao=fase&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fp
p%2Fvisualizar.jsp

PACHECO, 2012 PACHECO, J. O. Desenvolvimento de um Sistema Didático para Ensino de Conversores CC-CA com Monitoramento por Microcontroladores. Monografia (Pós Graduação). 2012. 9, 14.

PINTO, Almeida; ZILLES, Roberto. Eficiência brasileira de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. ASADES em Energías Renovables y Médio Ambiente, v. 15, 2011. ISSN 0329-5184. Disponível em <https://www.academia.edu/16604741/Efic>. Acesso em: 26 de abril de 2024.

PRIEB, César Wilhelm Massen. Determinação da eficiência de seguimento de máxima potência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição. 2011. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: Acesso em: 26 de abril de 2024.

PROGD. Brasília, 2017. Disponível no site: www.mme.gov.br. Acesso em: 06 de abril de 2024

RASHID, Muhammad H. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications. 2ª ed. Burlington: Academic Press, 2018. p. 191.

Renovigi. Catálogo de Produtos: Inversor Fotovoltaico RENO-30K. São Paulo: Renovigi, 2024.

Teixeira, Douglas Ângelo. (2009). Análise das distorções harmônicas – Estudo de caso de um sistema industrial. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.

VILLALVA, Marcelo Gradella. Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. 292 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/260742>>. Acesso em: 01 de maio de 2024.

ZILLES, Roberto et al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. . São Paulo: oficina de texto , 2012 . Acesso em: 09 abril. 2024.