

**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

MATEUS ANTONIO MOREIRA MARTINS

**ANÁLISE DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA
DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
COMERCIAL DE 149,33 KWP**

VALPARAÍSO DE GOIÁS - GO

2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS VALPARAISO

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

TERMO 6/2023 - VAL-CCBENG/VAL-DAA/CP-VALPARA/IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia - Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho apresentado em evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome completo do(a) autor(a): Mateus Antonio Moreira Martins

Matrícula: 20191150050274

Título do trabalho: Análise de qualidade de energia elétrica de um sistema fotovoltaico comercial de 149,33 kWp

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
- ☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
- ☐ Outra justificativa: _____.

Declaração de distribuição não-exclusiva

O(A) referido(a) autor(a) declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;

- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Valparaíso de Goiás, 7 de dezembro de 2023.

(assinado eletronicamente)
MATEUS ANTONIO MOREIRA MARTINS
Autor(a) e/ou Detentor(a) dos Direitos Autorais

Documento assinado eletronicamente por:

- **Mateus Antônio Moreira Martins, 20191150050274 - Discente**, em 07/12/2023 09:33:22.

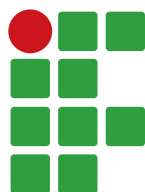
Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/11/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 478233

Código de Autenticação: f11bab45ac



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
BR 040, KM 6, Avenida Saia Velha, S/Nº, Área 8, Parque Esplanada V, VALPARAÍSO DE GOIÁS / GO, CEP 72876-601
Sem Telefones cadastrados



**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

MATEUS ANTONIO MOREIRA MARTINS

**ANÁLISE DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA
DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO
COMERCIAL DE 149,33 KWP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás – Câmpus Valparaíso, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: PROF. DR. PEDRO HENRIQUE FRANCO MORAES, IFG

VALPARAÍSO DE GOIÁS - GO

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M386a Martins, Mateus Antonio Moreira

Análise de qualidade da energia elétrica de um sistema fotovoltaico comercial de 149,33 kw [recurso eletrônico] / Mateus Antonio Moreira Martins. -- 2023.

Dados eletrônicos (1 arquivo).
56 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Franco Moraes.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, câmpus Valparaíso, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web.

Arquivo de texto em formato PDF.

Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br>.

1. Energia solar. 2. Energia elétrica - Controle de qualidade. 3. Fator de potência. 4. Harmônicos (Ondas elétricas). 5. Energia - Fontes alternativas. I. Título. II. Moraes, Pedro Henrique Franco, orient.

CDD 621.31



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS VALPARAÍSO

Folha de Aprovação

TERMO 3/2023 - VAL-CCBENG/VAL-DAA/CP-VALPARA/IFG

MATEUS ANTONIO MOREIRA MARTINS

ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COMERCIAL DE 149,33 KWP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Valparaíso, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Monografia defendida e aprovada, em 6 de dezembro de 2023, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

(assinado eletronicamente)

Prof. Dr. PEDRO HENRIQUE FRANCO MORAES
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG
Presidente da banca / Orientador(a)

(assinado eletronicamente)

Prof. Me. ALISSON LIMA SILVA
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG
Membro da banca

(assinado eletronicamente)

Profa. Dra. JESSICA SANTORO GONÇALVES PENA
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG
Membro da banca

Valparaíso de Goiás, 7 de dezembro de 2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Pedro Henrique Franco Moraes**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/02/2024 11:45:06.
- **Jessica Santoro Goncalves Pena**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/12/2023 09:17:50.
- **Alisson Lima Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/12/2023 08:17:04.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/11/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 478238

Código de Autenticação: 5899f8e6c0



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

BR 040, KM 6, Avenida Saia Velha, S/Nº, Área 8, Parque Esplanada V, VALPARAÍSO DE GOIÁS / GO, CEP 72876-601
Sem Telefones cadastrados

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e pelas valiosas oportunidades que tem colocado em meu caminho, à minha esposa Eduarda e a minha família pelo apoio e por ter me encorajado a continuar.

Resumo

A rápida expansão da energia fotovoltaica no Brasil ressalta a importância de se dedicar uma atenção especial à qualidade da energia elétrica (QEE), fundamental para preservar os padrões estabelecidos nos procedimentos de distribuição (PRODIST). É proposta uma análise aprofundada da QEE em um sistema fotovoltaico comercial com capacidade de 149,33 kWp. Inicialmente, será realizada uma caracterização abrangente do consumo e da geração de energia do sistema em questão. Posteriormente, a pesquisa se concentrará na avaliação de pontos críticos, com destaque para o fator de potência e distorções harmônicas. Este estudo visa identificar possíveis desafios na QEE do sistema fotovoltaico e propor estratégias e soluções para aprimorar seu desempenho.

Palavras-Chave: Sistema fotovoltaico; Qualidade da energia elétrica; Fator de potência; Harmônicas; Energia renovável.

Abstract

The rapid expansion of photovoltaic energy in Brazil emphasizes the importance of dedicating special attention to the quality of electrical energy (QEE), which is essential to preserve the established standards in distribution procedures (PRODIST). In this study, we propose a thorough analysis of QEE in a commercial photovoltaic system with a capacity of 149.33 kWp. Initially, a comprehensive characterization of the consumption and energy generation of the system in question will be conducted. Subsequently, the research will focus on the evaluation of critical points, with emphasis on power factor and harmonic distortions. This study aims to identify potential challenges in the QEE of the photovoltaic system and propose strategies and solutions to enhance its performance.

Keywords: Photovoltaic system; Power quality; Power factor; Harmonics; Renewable energy.

Lista de Figuras

1.1	Evolução da geração fotovoltaica e da potência instalada no Brasil	19
1.2	Tensão e corrente para um sistema elétrico com cargas lineares	19
2.1	Módulo Fotovoltaico (associação de 36 células).....	23
2.2	Gráfico Corrente x Tensão em Função da Temperatura	24
2.3	Circuito Elementar de Modulação PWM	26
2.4	Gráfico do Circuito PWM	27
2.5	Afundamento e Elevação de Tensão	29
2.6	Relações entre kW, kVAr e kVA	30
3.1	Parâmetros Elétricos do Inversor de 33,3kW	35
3.2	Parâmetros Elétricos do Inversor de 75kW	36
3.3	Parâmetros Elétricos do Módulo Utilizado.....	38
3.4	Analizador de Energia Primata P55	39
3.5	Instalação do Analizador de Energia.....	39
4.1	Perfil de Consumo.....	41
4.2	Consumo Diário dia 23/05/2023	41
4.3	Curva de Geração dia 23/05/2023	42
4.4	Queda de Fornecimento.....	42
4.5	Potência Injetada no Sistema de Distribuição	43
4.6	Perfil de Carga sem Geração Fotovoltaica (FP)	44
4.7	Perfil de Carga sem Geração Fotovoltaica (W).....	44
4.8	Perfil de Carga sem Geração Fotovoltaica (kVAr).....	45
4.9	Perfil de Carga com Geração Fotovoltaica (FP).....	45
4.10	Perfil de Carga com Geração Fotovoltaica (W)	46
4.11	Perfil de Carga com Geração Fotovoltaica (kVAr)	46

4.12 Componentes Harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª e DHT Impar	48
4.13 Componentes Harmônicas de 2ª e 4ª.....	49
4.14 Componente Harmônicas DHT Par	50
4.15 Componente Harmônicas de 3ª, 6ª, 9ª e DHT Tripla.....	51
4.16 DHT de Corrente	51

Lista de Tabelas

2.1	Terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas.....	31
2.2	Limite dos indicadores totais de harmônicas	32
2.3	Indicador de Desequilíbrio de Tensão	32
2.4	Terminologia.....	33
2.5	Limites para flutuação de tensão.....	33
4.1	Resultados do Primeiro e Segundo caso	48
4.2	Resultados Harmônicos Pares	49
4.3	Resultados Harmônicos Triplos.....	50

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Lista de Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DHT	Distorção Harmônica Total
FP	Fator de Potência
GW	Gigawatt
KVA	Quilovolt-ampere
kVAr	Quilovolt-ampere reativo
MPPT	Ponto de Máxima Potência
MW	Megawatt
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede
W	Watt

Lista de Símbolos

$DITH_{\%}$	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
-------------	---

$DTT_{3\%}$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3
$DTT_3\ 95\%$	Valor da DTT_3 superado apenas em 5% das 1008 leituras válidas
$DTT_{i\%}$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3
$DTT_i\ 95\%$	Valor da DTT_i superado apenas em 5% das 1008 leituras válidas
$DTT_{p\%}$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3
$DTT_p\ 95\%$	Valor da DTT_p superado apenas em 5% das 1008 leituras válidas
$DTT_{\%}$	Distorção harmônica total de tensão
$DTT\ 95\%$	Valor da DTT superado apenas em 5% das 1008 leituras válidas
FP	Fator de Potência
h	Ordem harmônica
h_{max}	Ordem harmônica máxima
h_{min}	Ordem harmônica mínima
Hz	Hertz
P	Potência Ativa (W)
P_{lt}	Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração
P_{st}	Severidade de Flutuação de tensão de Curta Duração
$P_{st}\ 95\%$	Valor do indicador P_{st} que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas
S	Potência Reativa (kVAr)
V_0	Tensão de Saída
V_h	Tensão harmônica de ordem h
V_n	Tensão Nominal

V_{in}	Tensão de Entrada
V_{mod}	Tensão Moduladora
V_{port}	Tensão da Portadora
X_c	Reatância Capacitiva

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	20
1.3	OBJETIVOS GERAIS.....	21
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.5	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	22
2.1.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	22
2.1.2	PRINCIPAIS COMPONENTES	23
2.2	QUALIDADE DE ENERGIA.....	28
2.2.1	DEFINIÇÕES	28
2.2.2	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE.....	28
2.2.3	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	32
2.2.4	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO.....	32
2.2.5	VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA.....	33
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ESTUDO.....	34
3.2	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO E MÉTODOS UTILIZADOS	34
3.2.1	COLETA DE DADOS E DURAÇÃO DO ESTUDO	37
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	40
4.1	INTRODUÇÃO	40
4.2	ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	40

4.2.1	PERFIL DE CONSUMO DO SISTEMA.....	40
4.2.2	QUEDA DE FORNECIMENTO	42
4.2.3	ANÁLISE DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA	43
4.2.4	ANÁLISE DO PERFIL DE CARGA	43
4.2.5	HARMÔNICOS	47
4.2.6	DHT DE CORRENTE	51
5	CONCLUSÃO.....	53
5.1	CONCLUSÃO GERAL.....	53
5.2	TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

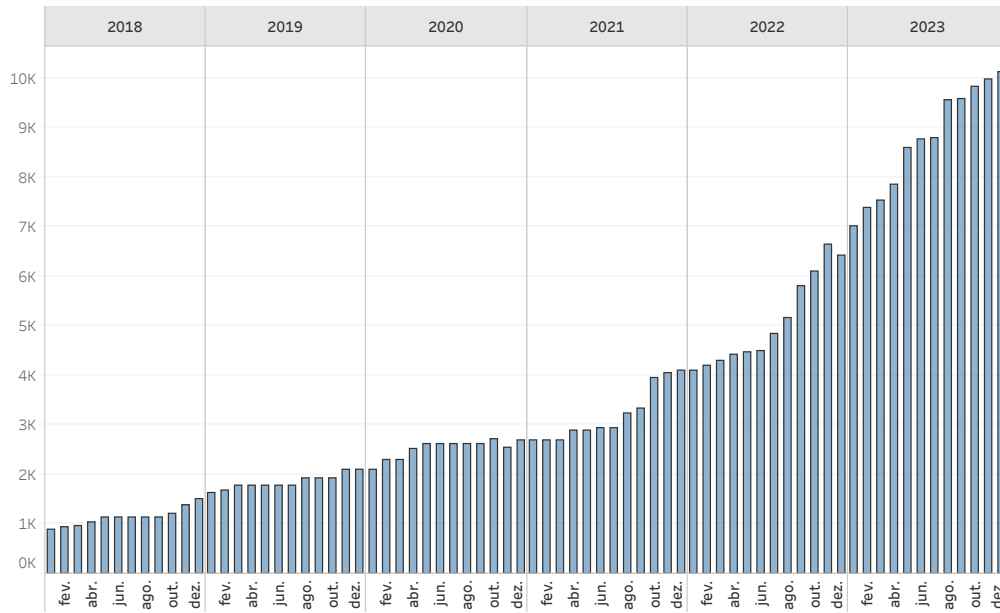
Nos últimos anos, a escassez de recursos hídricos e as limitações dos combustíveis fósseis acentuaram o foco na exploração das fontes de energias renováveis [1]. A geração fotovoltaica emergiu como uma tendência global para complementação de matrizes energéticas em todo mundo [1]. No Brasil, a capacidade de geração atingiu cerca de 21 MW [2]. Entre janeiro e setembro de 2023, houve o maior aumento da capacidade de geração solar centralizada da história do Brasil. Em 2022, por exemplo, o acréscimo no ano foi de 2,5 GW, ou seja, um crescimento inferior aos 3 GW instalados entre janeiro e setembro de 2023. Na Figura 1.1, é possível verificar a evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica no país.

Nesse contexto de rápido crescimento da energia solar no Brasil, a preocupação com a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) em sistemas fotovoltaicos torna-se relevante. A Lei nº 14.300/2022, sob regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), exerce papel fundamental no controle da conexão desses sistemas à rede de distribuição, estabelecendo diretrizes para essa integração.

Segundo Afonso (2003) [3], durante dezenas de anos a grande maioria dos receptores ligados às redes de energia elétrica consistiam em cargas lineares. Por essa razão, e uma vez que as tensões da alimentação são sinusoidais, a corrente consumida era também sinusoidal e da mesma frequência, podendo apenas encontrar-se desfasadas relativamente à tensão, conforme Figura 1.2.

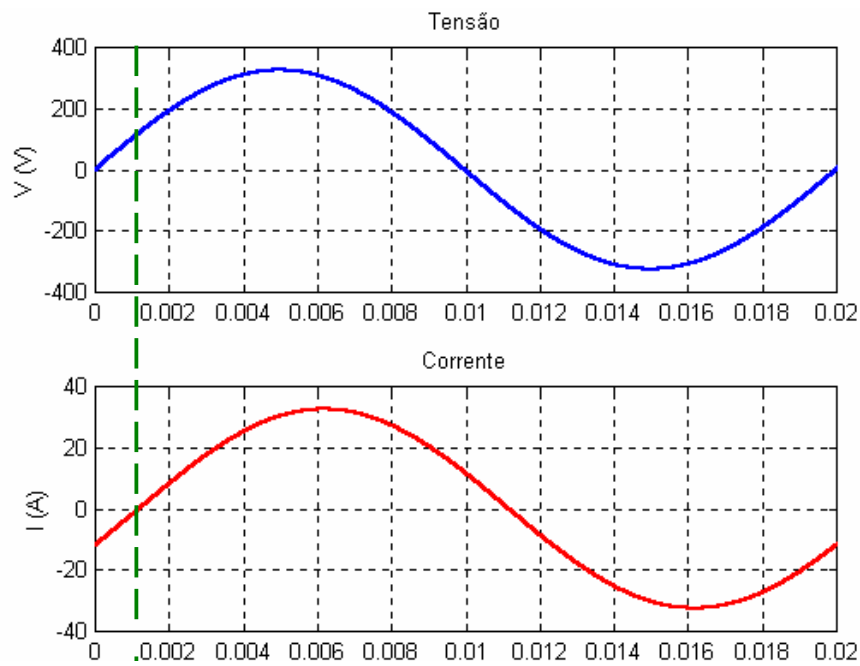
Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, os equipamentos passam a não fun-

Figura 1.1: Evolução da geração fotovoltaica e da potência instalada no Brasil



Fonte: Adaptado de ONS (2023) [2]

Figura 1.2: Tensão e corrente para um sistema elétrico com cargas lineares



Fonte: AFONSO (2003) [3]

cionar como cargas lineares, consumindo corrente não senoidais, desta forma “poluindo” a rede elétrica [3]. Segundo Villalva (2020) [4], o inversor solar é um equipamento eletrônico complexo, composto por uma estrutura básica de transistores de potência, placa de controle com microprocessador, filtros de entrada e saída e sistemas auxiliares de interface e comunicação.

Portanto, faz-se necessário realizar estudos abrangentes de QEE para compreender os impactos dessa forma de geração de energia nas redes elétricas de transmissão e distribuição. Com isso, é possível garantir o fornecimento confiável de eletricidade, mesmo em sistemas complexos com múltiplas fontes de geração.

1.2 Justificativa

O estudo de QEE para sistemas fotovoltaicos é importante para a garantia de eficiência e confiabilidade na geração de energia. É importante destacar que ao atender aos parâmetros de qualidade de energia definidos no Procedimentos de Distribuição (PRODIST) Módulo 8 - “Qualidade da Energia Elétrica”, é possível prolongar a vida útil do sistema e minimizar as perdas de energia.

Os problemas na QEE analisados pelo PRODIST envolvem [5]:

- i. interrupção no fornecimento de energia;
- ii. variações nos níveis de tensão;
- iii. flutuações na tensão e na frequência;
- iv. distorções harmônicas nas correntes e tensão;
- v. presença de ruídos;
- vi. ocorrência de transitórios, entre outros.

Segundo Junior Ruther (2016) [6], investigar a QEE de sistemas na fase de concepção é importante para complementar os estudos de projeto, o que garante a funcionalidade adequada dos equipamentos.

O PRODIST Módulo 8 estabelece conceitos relacionados à QEE, além de definir limites para a variação de tensão, frequência, distorção harmônica, fator de potência e outros parâmetros [5].

1.3 Objetivos Gerais

O propósito deste trabalho é conduzir uma análise das distorções harmônicas geradas por um sistema fotovoltaico de 149,33 quilowatt pico (kWp). A análise tem por objetivo apontar possíveis distúrbios causados pela planta considerando o Módulo 8 do PRODIST como referência.

1.4 Objetivos Específicos

- Avaliar parâmetros de QEE em um sistema de 149,33 kWp: Conduzir a análise dos parâmetros críticos, como fator de potência, desequilíbrio de tensão, variação de frequência, distorções harmônicas e flutuação de tensão;
- Comparar com Normas Reguladoras: Com base nos resultados obtidos, comparar com as normas que versam sobre QEE;
- Analisar Impactos na Eficiência do Sistema: Por meio de simulação com softwares, analisar a influência da QEE no sistema fotovoltaico com ênfase em vida útil e em produção de energia.

1.5 Organização textual

Este capítulo estabelece a relevância e os objetivos do trabalho, abordando a contextualização, justificativas e objetivos específicos.

O Capítulo 2 apresenta a base teórica necessária para as análises subsequentes, discutindo conceitos e teorias relevantes ao tema.

O Capítulo 3 detalha a metodologia utilizada para analisar a energia em sistemas fotovoltaicos, incluindo procedimentos, ferramentas e técnicas empregadas.

O Capítulo 4 aborda os resultados obtidos, analisando sua relevância em relação aos objetivos propostos e contribuindo para o avanço do conhecimento na área.

O Capítulo 5 conclui o estudo, resumindo as principais descobertas, identificando áreas para pesquisas futuras e destacando as contribuições do trabalho para a área.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Fundamentos da Energia Solar Fotovoltaica

2.1.1 Princípios de Funcionamento

A geração fotovoltaica é o processo de transformação da energia solar em eletricidade, através do fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico. Esse fenômeno é crucial na geração de eletricidade através da luz solar, e ocorre quando semicondutores absorvem fótons, gerando elétrons e originando uma corrente elétrica. A interação fóton-elétron resulta na formação de pares elétron-lacuna, sendo essenciais para a conversão eficiente de energia solar em eletricidade através da tecnologia fotovoltaica. A separação destes pares, mediada por um campo elétrico interno, propicia a produção direta de uma corrente elétrica intrínseca ao semicondutor, consolidando o efeito fotovoltaico [7].

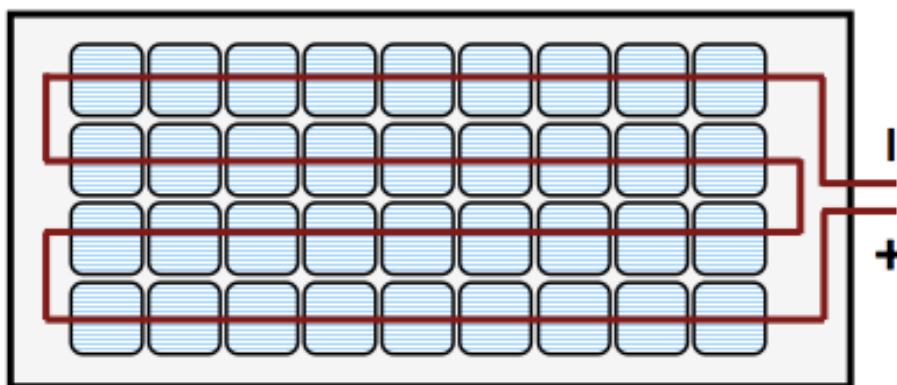
Segundo Severino e Oliveira (2010) [8], o efeito fotovoltaico é gerado através da absorção da luz solar, que ocasiona uma diferença de potencial na estrutura do material semicondutor. Nascimento (2014, p.14) [9] afirma que uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, apenas mantém o fluxo de elétrons num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno é denominado de Efeito Fotoelétrico.

2.1.2 Principais Componentes

2.1.2.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são a parte principal do sistema e são formados por um conjunto de células fotovoltaicas associadas em série ou em paralelo. Segundo Carneiro (2010) [10], a potência máxima que é alcançada devido a utilização de uma única célula fotovoltaica não excede, via de regra, a potência de 3 Watts (W), o que é manifestamente insuficiente para a maioria das aplicações reais. Por este motivo, as células fotovoltaicas são normalmente agrupadas (ligadas em série), assim formando módulos fotovoltaicos, conforme esquematizado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Módulo Fotovoltaico (associação de 36 células)

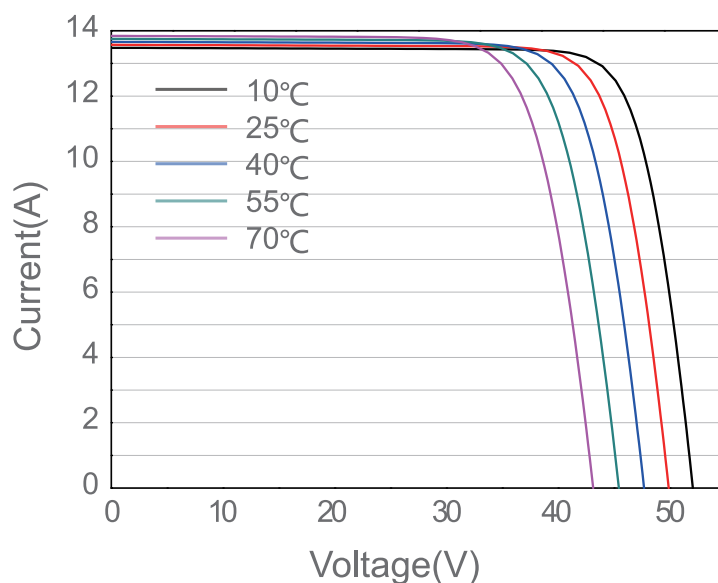


Fonte: Melo (2011) [10]

A influência da temperatura nos módulos fotovoltaicos é uma consideração crucial, como ressaltado por Araújo, Bueno e Rank (2016, p.40), ao examinar o comportamento das células fotovoltaicas em relação à irradiância solar e temperatura. De acordo com esses autores, a corrente gerada nas células fotovoltaicas apresenta uma sensibilidade mínima à temperatura, sendo mais fortemente correlacionada à irradiância solar. Entretanto, é notável um aumento leve na corrente, aproximadamente de 0,06% °C, com o aumento da temperatura, conforme indicado por Wilhelm (2011) [11].

É importante salientar que, apesar da relativa insensibilidade da corrente à temperatura, o aumento da temperatura provoca uma redução significativa na tensão das células fotovoltaicas [11]. Tal redução na tensão resulta em uma diminuição correspondente na potência gerada pelos módulos uma vez que potência se dá pelo produto de tensão e corrente conforme ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2: Gráfico Corrente x Tensão em Função da Temperatura



Fonte: *Datasheet JA540*

Posto isso, afim de maximizar a potência do sistema, torna-se necessária a conexão de vários módulos em série (painel) ou em paralelo, isso irá determinar também a tensão de operação do sistema fotovoltaico em corrente contínua (CC) [10]. Rüter [6] afirma que a corrente do gerador FV, é calculada através da conexão em paralelo de painéis individuais ou por conjunto de módulos conectados em série. Já a potência instalada é calculada através da soma da potência de cada módulo individualmente.

A eletricidade gerada pelos painéis fotovoltaicos é inicialmente em CC, mas muitas instalações elétricas residenciais e comerciais operam em CA. Portanto, é necessário um componente chamado inversor para converter a corrente contínua gerada em corrente alternada utilizável [6].

A conversão é crucial porque a maioria das redes elétricas utiliza corrente alternada para transmitir e distribuir energia. O inversor desempenha um papel vital nesse processo, ajustando a eletricidade gerada para atender aos padrões de tensão e frequência da rede elétrica local. Essa etapa é essencial para garantir uma integração eficiente e segura da energia solar na rede elétrica, permitindo que a eletricidade gerada pelos painéis seja utilizada de maneira eficaz pelos consumidores [6].

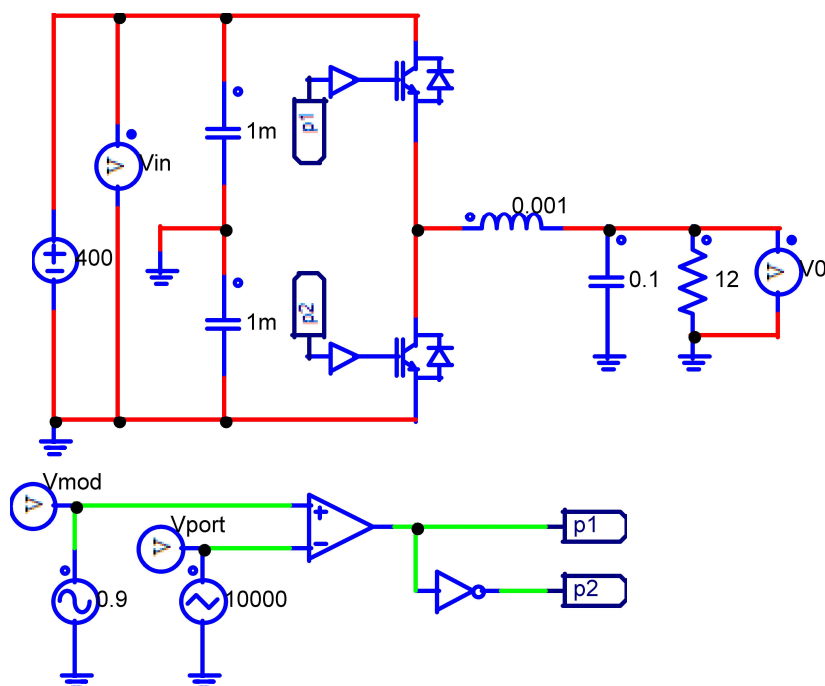
2.1.2.2 Inversores Fotovoltaicos

Os inversores desempenham um papel fundamental no contexto de sistemas fotovoltaicos conectados a rede (SFRCR), sendo encarregados da conversão da corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em CA. De acordo com Pereira e Gonçalves (2008) [12], as atribuições primordiais dos inversores em SFRCR abrangem:

- Rastreamento do Ponto Máximo de Potência (MPPT):
 - O Ponto de Máxima Potência (MPPT) é um conceito essencial em sistemas fotovoltaicos, permitindo a otimização contínua do desempenho dos módulos fotovoltaicos. O MPPT é um algoritmo ou técnica que ajusta dinamicamente a operação dos painéis solares para garantir que eles estejam sempre operando nas proximidades de seu potencial máximo de geração de energia [11];
 - Esse mecanismo é crucial porque as condições ambientais, como variações na intensidade da luz solar e na temperatura, podem influenciar a capacidade dos módulos de gerar energia. O MPPT monitora constantemente as condições de operação e ajusta a carga elétrica nos módulos para garantir que operem na posição ideal da curva I-V, onde a potência gerada é máxima [11];
 - Em termos práticos, o MPPT assegura que os módulos fotovoltaicos operem consistentemente no ponto de máxima potência, maximizando, assim, a eficiência geral do sistema fotovoltaico. Esse ajuste dinâmico garante que a energia solar disponível seja aproveitada da maneira mais eficaz possível, contribuindo para a maximização da produção de eletricidade e, conseqüentemente, otimizando o retorno sobre o investimento em sistemas fotovoltaicos, como destacado por Aynoã Micaella (2020) [13].
- Conversão de CC para CA:
 - Uma das funções centrais dos inversores é a conversão da CC gerada pelos módulos fotovoltaicos em CA, tornando-a compatível com os padrões de eletricidade da rede. Os inversores operam por meio de um processo de modulação de largura de pulso (PWM) ou através de técnicas mais avançadas, como a modulação por largura de pulso sinusoidal (SPWM). No processo de PWM, a corrente contínua é transformada em uma série de pulsos através de uma onda portadora, onde a largura dos pulsos varia para modular a quantidade de energia transmitida através da tensão moduladora [11];

- Nas Figuras 2.3 e 2.4 é possível observar um circuito elementar PWM com seu respectivo gráfico, onde V_0 é a tensão de saída, V_{in} a tensão de entrada, V_{mod} é a tensão moduladora e V_{port} a tensão da portadora [14].

Figura 2.3: Circuito Elementar de Modulação PWM



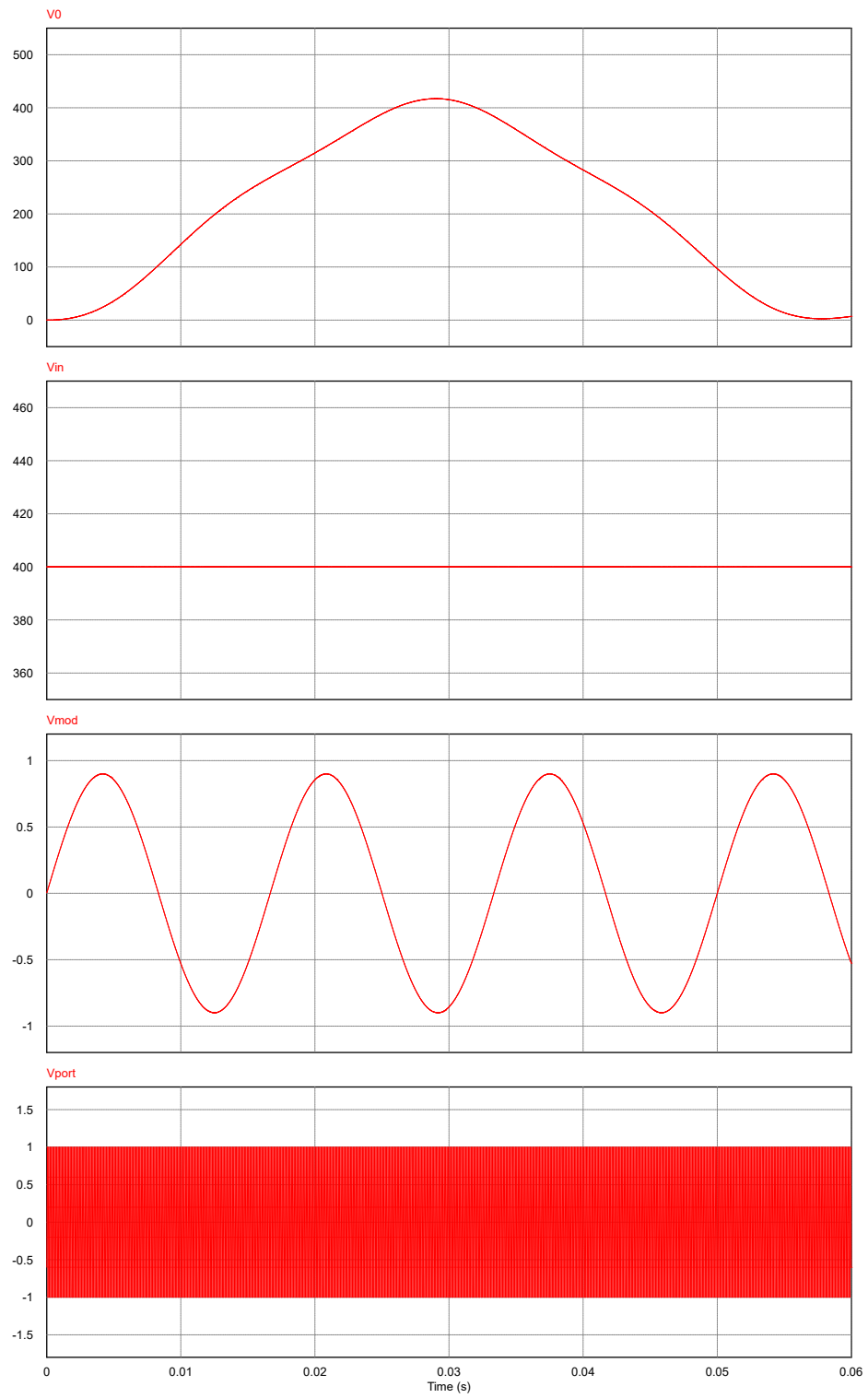
Fonte: Autoria própria

- Desconexão e Isolamento:

- Em situações em que os níveis de corrente, tensão e frequência não estejam dentro das faixas estabelecidas pelos padrões da rede elétrica, os inversores têm a responsabilidade de desconectar o sistema. Além disso, em casos de falha na rede elétrica, ocorre o isolamento do gerador fotovoltaico, preservando a integridade do sistema.

Essas funcionalidades não apenas evidenciam a complexidade técnica dos inversores, mas também sublinham sua importância crucial para garantir o desempenho otimizado e seguro dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Figura 2.4: Gráfico do Circuito PWM



Fonte: Autoria própria

2.2 Qualidade de Energia

2.2.1 Definições

Qualidade de energia elétrica refere-se à conformidade dos parâmetros da energia elétrica, como tensão, frequência e forma de onda, com as necessidades dos dispositivos e sistemas, garantindo um fornecimento confiável e sem distúrbios. Pode-se denominar “distúrbios” uma série de fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica, que vão desde problemas na continuidade do fornecimento; níveis de tensão; oscilações de tensão e de frequência; distorções harmônicas na tensão e na corrente; interferência eletromagnética irradiada e conduzida; entre outras [6].

Entre os problemas de qualidade de energia, a interrupção do fornecimento é o mais grave, visto que afeta todos os equipamentos ligados à rede elétrica [3]. Contudo, existem outros problemas de QEE, como:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Distorções Harmônicas;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variação de frequência.

2.2.2 Tensão em regime permanente

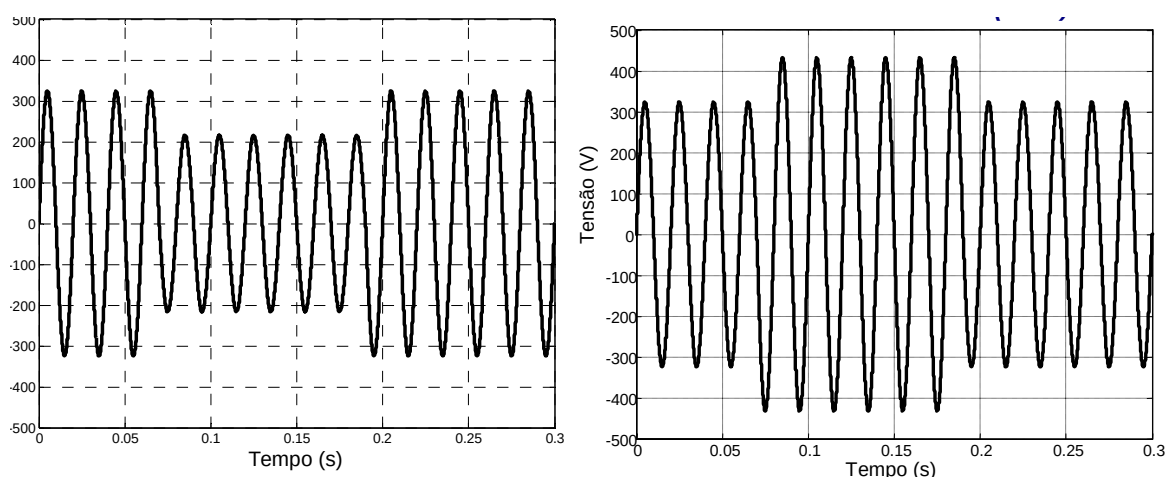
A análise da tensão em regime permanente é um conceito fundamental na pesquisa e na prática da engenharia elétrica. Esse regime está associado à estabilidade e à condição de equilíbrio nos sistemas elétricos, onde as grandezas elétricas, como tensão e corrente, não variam com o tempo.

Segundo o PRODIST (2017) [5] a tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes atendidos em tensão nominal de operação superior a 1 kV deve situar-se entre 95%

(noventa e cinco por cento) e 105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão e, ainda, coincidir com a tensão nominal de um dos terminais de derivação previamente exigido ou recomendado para o transformador da unidade consumidora.

Nos casos que a tensão é elevada é chamado de elevação de tensão. Quando a tensão elétrica é reduzida esse fenômeno é denominado “afundamento de tensão”. A Figura 2.5 é possível observar afundamento e elevação de tensão, respectivamente.

Figura 2.5: Afundamento e Elevação de Tensão



Fonte: Gomes 2003 [3]

2.2.2.1 Fator de Potência

A regulação do fator de potência em sistemas elétricos é uma questão de grande importância para garantir a eficiência energética e a estabilidade do sistema. É uma medida que descreve a eficiência com que a eletricidade é convertida em trabalho útil em um sistema elétrico. Segundo Antenor (2014) [15], fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem.

O PRODIST [5] define que para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo.

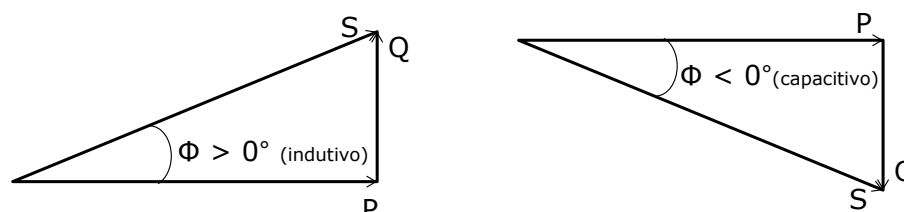
Manter o fator de potência dentro desses limites é importante não apenas para a eficiência, mas também para evitar prejuízos tarifários e sobrecarregar a rede elétrica. Na concessionária

de energia Neoenergia Brasília [16], por exemplo, a tarifa pelo consumo reativo excedente representa 58% da tarifa de consumo ativo.

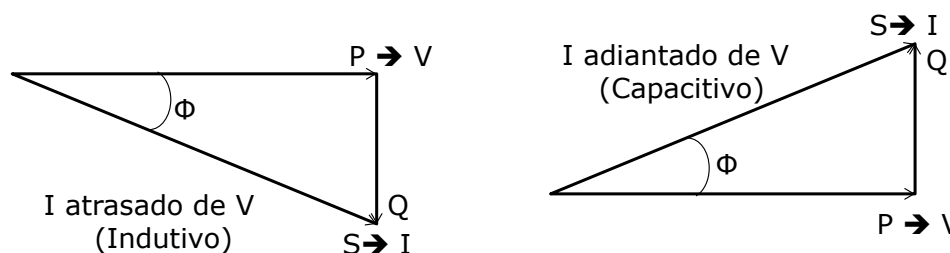
Na Figura 2.6 é possível observar a relação entre potência ativa, reativa e aparente.

Figura 2.6: Relações entre kW, kVAr e kVA

- Natureza da Carga (sinal de Φ)



- Relação de Defasagem entre Corrente e Tensão



Fonte: Fergutz (2016) [17]

2.2.2.2 Distorções Harmônicas

Distúrbios harmônicos referem-se à presença de componentes de frequência indesejadas em um sinal de tensão ou corrente elétrica. Essas componentes harmônicas são múltiplos inteiros da frequência fundamental da rede elétrica (geralmente 50 ou 60 Hertz (Hz)), e podem ser causadas por diversos fatores, como cargas não lineares, dispositivos eletrônicos, equipamentos elétricos defeituosos e outras fontes de interferência.

Segundo Gomes [3], quando existem cargas não lineares ligadas à rede elétrica a corrente que circula nas linhas contém harmônicos e as quedas de tensão provocadas pelos harmônicos nas impedâncias das linhas faz com que as tensões de alimentação fiquem também distorcidas.

No módulo 8 do PRODIST [5], foi definido que a análise das distorções harmônicas deve ser realizada utilizando as medições de tensão entre a fase e o neutro em sistemas que possuem configuração estrela com aterramento. Enquanto nas demais configurações, as medições devem ser

feitas entre as fases. Ao calcular a distorção harmônica total, é necessário levar em consideração todas as componentes de harmônicas, desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem. A Tabela 2.1 sintetiza a terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas.

Tabela 2.1: Terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DITH_{h\%}$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT_{\%}$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_{p\%}$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_{i\%}$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_{3\%}$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h_{max}
Ordem harmônica mínima	h_{min}

Fonte: PRODIST (2017) [5]

As expressões para o cálculo das grandezas $DITH_{h\%}$, $DTT_{\%}$, $DTT_{p\%}$, $DTT_{i\%}$ e $DTT_{3\%}$ são:

$$DITH_{h\%} = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Para a corrente, emprega-se:

$$DII_{\%} = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Para o cálculo total das distorções harmônicas utiliza-se:

$$DTT_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=max}}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

E para corrente total utiliza-se:

$$DIT_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=max}}}{I_1} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

O PRODIST estabelece os limites dos indicadores harmônicos totais para tensões nominais, com base nos dados presente na Tabela 2.2.

Os indicadores $DTT_{95\%}$, $DTT_p_{95\%}$, $DTT_i_{95\%}$, $DTT_3_{95\%}$ significam que os valores

Tabela 2.2: Limite dos indicadores totais de harmônicas

Indicador	Tensão nominal (V_n)		
	$V_n < 2,3kV$	$2,3kV < V_n < 69kV$	$69kV < V_n < 230kV$
$DTT_{95\%}$	10,0	8,0	5,0
$DTT_p_{95\%}$	2,5	2,0	1,0
$DTT_i_{95\%}$	7,5	6,0	4,0
$DTT_3_{95\%}$	6,5	5,0	3,0

Fonte: PRODIST (2017) [5]

foram superados apenas 5% das 1008 leituras válidas.

2.2.3 Desequilíbrio de Tensão

Segundo o PRODIST (2017), 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. Em sistemas de energia elétrica CA, como os sistemas trifásicos comuns, é essencial que as tensões nas diferentes fases estejam equilibradas para garantir o funcionamento seguro e eficiente dos dispositivos elétricos e equipamentos conectados à rede.

Os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão estão apresentados na Tabela 2.3 e nela é possível observar que para uma tensão nominal (V_n), menor que 1 kV o indicador está em 3%, já para o intervalo de $1kV < V_n < 230kV$ o desequilíbrio pode ser de apenas 2%.

Tabela 2.3: Indicador de Desequilíbrio de Tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0kV$	$1kV < V_n < 230kV$
FD 95%	3,0%	2,0%

Fonte: PRODIST (2017) [5]

2.2.4 Flutuação de Tensão

A flutuação de tensão, também conhecida como variação de tensão, refere-se às variações de tensão elétrica em um sistema de energia elétrica. A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea [5].

A Tabela 2.4 sintetiza a terminologia aplicável às formulações de cálculo da sensação de cintilação luminosa.

Tabela 2.4: Terminologia

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 P_{st} que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$P_{st} 95\%$

Fonte: PRODIST(2017)

A seguir, a Tabela 2.5 faz referência aos valores limites para flutuação de tensão.

Tabela 2.5: Limites para flutuação de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n < 1,0kV$	$69kV < V_n < 230kV$
$P_{st} 95\%$	1,0 pu	2,0 pu

Fonte: PRODIST (2017) [5]

2.2.5 Variação de Frequência

O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas a ele devem, em situações normais de operação e em estado estável, manter a frequência elétrica dentro de uma faixa de 59,9 Hz a 60,1 Hz. No caso de ocorrência de perturbações no sistema de distribuição, as instalações de geração têm a responsabilidade de assegurar que a frequência retorne, no prazo de 30 segundos após o evento perturbador, para a faixa entre 59,5 Hz e 60,5 Hz. Isso é fundamental para permitir a recuperação do equilíbrio entre a carga elétrica e a geração de energia [5].

Se for necessário desligar parte da geração ou da carga para restabelecer o equilíbrio entre carga e geração durante distúrbios no sistema de distribuição, a frequência não deve ultrapassar 66 Hz ou cair abaixo de 56,5 Hz em condições extremas. Além disso, a frequência pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos. Por outro lado, a frequência pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos. Essas restrições visam garantir a estabilidade e a segurança do sistema elétrico durante eventos perturbadores [5].

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Descrição do sistema fotovoltaico em estudo

O sistema fotovoltaico em questão é constituído por um gerador fotovoltaico composto por 274 módulos da marca Longi, cada um com uma potência de 545 W, totalizando uma potência de 149,33 kWp. Esse gerador é combinado com dois inversores Solar Edge, um de 33,3 kW e outro de 75 kW, que, juntos, somam uma potência nominal de 108,6 kW. Esses inversores desempenham a função de conversor de corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente alternada.

Entre os dados cruciais a serem extraídos dos *datasheets*, destaca-se a distorção harmônica total dos inversores, objeto de estudo deste trabalho. Além disso, a eficiência dos módulos também é de extrema importância, pois impacta diretamente no desempenho adequado do sistema. A Figura 3.1 e 3.2 são os *datasheets* dos inversores de 33,3 kW e de 75kW respectivamente, e a Figura 3.3 dos módulos utilizados.

3.2 Instrumentos de medição e métodos utilizados

Um equipamento analisador de energia, também conhecido como analisador de qualidade de energia ou analisador de potência, é um dispositivo utilizado para medir, monitorar e analisar diversos parâmetros elétricos em um sistema de distribuição de energia elétrica. Esses equipamentos desempenham um papel fundamental na gestão e no controle da qualidade da energia

Figura 3.1: Parâmetros Elétricos do Inversor de 33,3kW

/ Three Phase Inverter

For Europe

SE25K / SE30K / SE33.3K

Applicable to inverters with part number	SEXK-RWX0IXXX			
	SE25K	SE30K	SE33.3K	
OUTPUT				
Rated AC Active Power Output	25000	29990	33300	W
Maximum AC Apparent Output Power	25000	29990	33300	VA
AC Output Voltage - Line to Line / Line to Neutral (Nominal)	380 / 220; 400 / 230			Vac
AC Output Voltage - Line to Line / Line to Neutral	304 - 437 / 176 - 253; 320 - 460 / 184 - 264.5			Vac
AC Frequency	50/60 ± 5%			Hz
Maximum Continuous Output Current (per Phase)	36,25	43,5	48,25	Aac
AC Output Line Connections	3W + PE, 4W + PE			
Utility Monitoring, Islanding Protection, Configurable Power Factor, Country Configurable Thresholds	Yes			
Total Harmonic Distortion	< 3			%
Power Factor Range	+/-0.2 to 1			
Maximum Residual Current Injection(I)	100			mA
INPUT				
Maximum DC Power (Module STC)	43750	52500	58275	W
Transformer-less, Ungrounded	Yes			
Maximum Input Voltage DC+ to DC-	1000			Vdc
Operating Voltage Range	680-1000			Vdc
Maximum Input Current	36,25	43,5	48,25	Adc
Reverse-Polarity Protection	Yes			
Ground-Fault Isolation Detection	167kΩ Sensitivity ⁽²⁾			
Maximum Inverter Efficiency	98,3			%
European Weighted Efficiency	98			%
Nighttime Power Consumption	< 4			W
ADDITIONAL FEATURES				
Supported Communication Interfaces	2 x RS485, Ethernet, Wi-Fi (optional) ⁽³⁾ , Cellular (optional)			
Smart Energy Management	Export Limitation			
Inverter Commissioning	With the SetApp mobile application using built-in Wi-Fi access point for local connection			
Arc Fault Protection	Integrated, User Configurable (According to UL1699B)			
Rapid Shutdown	Optional ⁽⁴⁾ (Automatic upon AC Grid Disconnect)			
RS485 Surge Protection	Optional			
DC Surge Protection	Type II, field replaceable, integrated			
AC Surge Protection	Type II, field replaceable, optional			
DC SAFETY UNIT (OPTIONAL)				
2-pole Disconnection	1000V / 48,25A			
DC Fuses (Single Pole)	Optional, 25A			
Compliance	UTE-C15-712-1			
STANDARD COMPLIANCE				
Safety	IEC-62109, AS3100			
Grid Connection Standards ⁽⁵⁾	VDE-AR-N-4105, AS-4777, EN50438, CEI-021, VDE 0126-1-1, CEI-016, EN50549-1, EN50549-2, VDE-AR-N-4110, TOR Erzeuger Typ A, G99, G99 (NI), VFR 2019			
Emissions	IEC61000-6-2, IEC61000-6-3 Class A, IEC61000-3-11, IEC61000-3-12			
RoHS	Yes			
INSTALLATION SPECIFICATIONS				
AC Output Gland Diameter / Line cross section / PE cross section	Cable diameter 19-28 mm / 4 - 16 mm² / 4 - 16 mm²			
DC Input ⁽⁶⁾	4 MC4 pairs			
	4 MC4 pairs			
DC Input with Safety Unit ⁽⁶⁾⁽⁷⁾	4 Strings; Gland: Cable outer diameter 5 - 10 mm / Wire cross section 2,5 - 16 mm²			
Dimensions (H x W x D)	550 x 317 x 273			mm
Dimensions with Safety Unit (H x W x D)	836 x 317 x 300 (DC MC4); 819 x 317 x 300 (DC Gland)			mm
Weight	32			kg
Weight with Safety Unit	36,5			kg
Operating Temperature Range	-40 to +60 ⁽⁸⁾			°C
Cooling	Fan (user replaceable)			
Noise	< 62			dBA
Protection Rating	IP65 - outdoor and indoor			
Mounting	Brackets provided			

Fonte: *Datasheet* do fabricante

elétrica em instalações industriais, comerciais e residenciais.

O equipamento utilizado para análise é um Primata modelo P55. O Analisador Portátil de Qualidade de Energia P55 foi projetado para realizar medições em sistemas de distribuição de

Figura 3.2: Parâmetros Elétricos do Inversor de 75kW

/ Inversor Trifásico com Tecnologia Synergy

SE75K / SE100K / SE120K

Aplicável a inversores com part number	SExxK-xxx0lxxxx		SExxK-xxx8lxxxx	
	SE75K para redes 220/127V e 380/220V	SE100K para redes 380/220V	SE120K para redes 480/277V	
SAÍDA CA				
Potência Nominal ⁽¹⁾	55150 @ 220/127v 75000 @ 380/220v	95300	120000	W
Potência Máxima ⁽¹⁾	55150 @ 220/127v 75000 @ 380/220v	95300	120000	VA
Tensão Nominal (FF/FN)	380 / 220; 220 / 127	380 / 220	480 / 277	Vca
Faixa de tensão (FF/FN)	304 - 437 / 176 - 253; 176 - 253 / 102 - 146	304 - 437 / 176 - 253	432 - 529 / 249 - 305	Vca
Frequência Nominal	60 ± 5%			Hz
Máxima Corrente injetada (por fase)	145 @ 220/127v 120 @ 380/220v	145		Aca
Redes Trifásicas Compatíveis	3W + PE, 4W + PE			
Redes suportadas	WYE: TN-C, TN-S, TN-C-S, TT, IT; Delta: IT			
Máxima Corrente Residual Injetada ⁽²⁾	300			mA
Monitoramento de Rede, Proteção Anti-Ilhamento, Fator de Potência Configurável, Limites Configuráveis por País	Sim			
Distorção Harmônica Total (THD)	≤ 3			%
Fator de Potência	+/-0.8 to 1			
ENTRADA CC				
Máxima Potência-Pico (STC): Conjunto/Unidade	96510 / 32170 @ 220/127v 131250 / 43750 @ 380/220v	166775 / 55590	210000 / 70000	W
Transformer-less, Não Aterrado	Sim			
Faixa de Tensão de Operação	400 - 600 @220/127v 680 - 1000 @380/220v ; 480/277v			Vcc
Máxima Corrente de Entrada	3 x 48,25 @ 220/127v 3 x 40 @ 380/220v	3 x 48,25		Acc
Proteção Contra Inversão de Polaridade	Sim			
Deteção de Falha de Isolamento à Terra	167kΩ Sensitividade por unidade Synergy ⁽³⁾			
Máxima Eficiência do Inversor	98.3		98.1	%
Eficiência Euro (média)	98			%
Consumo Noturno	< 8	< 12		W
CARACTERÍSTICAS ADICIONAIS				
Interfaces de Comunicação Compatíveis ⁽⁴⁾	2 x RS485, Ethernet, Wi-Fi (opcional), Celular (opcional)			
Gerenciamento Smart Energy	Limitação de Exportação			
Comissionamento do Inversor	Com o aplicativo de celular SetApp usando o ponto de acesso Wi-Fi integrado para conexão local			
Proteção Contra Falha de Arco	Integrado, configurável pelo usuário (de acordo com UL1699B)			
Retificador de PID	Noturno, Integrado			
Proteção de surto (DPS) RS485 (portas 1+2)	Tipo II, substituível em campo, integrado			
Proteção de Surto (DPS) CC	Tipo II, substituível em campo, integrado			
Proteção de Surto (DPS) CA	Tipo II, substituível em campo, opcional			
Fusíveis CC (unipolar)	25A, opcional			
Chave seccionadora CC	Opcional			
CONFORMIDADE ÀS NORMAS				
Segurança	IEC-62109-1, IEC-62109-2			
Padrões de Conexão à Rede ⁽⁵⁾	VDE-AR-N-4105, AS-4777, EN 50549-1, EN 50549-2, CEI-021, VDE 0126-1-1, CEI-016			
Emissões	IEC61000-6-2, IEC61000-6-3 Class A, IEC61000-3-11, IEC61000-3-12			
RoHS	Sim			

(1) Potência para temperatura até 50°C, para informações sobre 'de-rating', acesse <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-temperature-derating-note.pdf>

(2) Se um dispositivo DR externo for necessário, o valor de ativação deverá ser >= 300mA

(3) Em locais cujas normas permitam

(4) Para especificações das comunicações opcionais, visite <https://www.solaredge.com/products/communication> ou na página da Biblioteca de Recursos: <https://www.solaredge.com/resource-library>, para baixar as especificações relevantes do produto

(5) Para download de documentos e certificações, acesse a categoria de Certificados na página da Biblioteca de Recursos: <https://solaredge.com/resource-library>

Fonte: *Datasheet* do fabricante

energia elétrica, as características do aparelho estão descritas abaixo:

- Análise e medição da qualidade de energia (tensões, correntes, potências, frequência, harmônicos, desequilíbrio de tensão e corrente, flutuação, registro de eventos, indicadores

individuais de qualidade);

- Atendimento ao PRODIST – Módulo 8 da ANEEL (Classe S);
- Análise de energia bidirecional (quatro quadrantes), energia consumida e injetada;
- Gestão de modalidade tarifária, demanda e análise de crédito de ICMS;
- Correção de fator de potência, espectro e perdas harmônicas (tensão e corrente);
- Suporte nas definições dos filtros de capacitores, com gráficos de espectro harmônico de tensão e corrente e lista para análise detalhada de amplitudes e perdas harmônicas;
- Determinação de *K-Factor* para análise da capacidade de um novo transformador em alimentar cargas não-lineares, e do Fator-K para *De-rating* (“desclassificação”) de transformadores em uso.

3.2.1 Coleta de dados e duração do estudo

O procedimento adotado para a análise envolve a leitura contínua do circuito ao longo de um período de 9 dias. Essa análise foi realizada no momento em que uma maior quantidade de potência será inserida na rede elétrica. Essa abordagem permitirá uma compreensão mais aprofundada dos padrões de consumo e das demandas de energia durante o pico de utilização, fornecendo *insights* importantes sobre o desempenho do sistema nesse momento crítico.

O equipamento foi instalado entrada de energia após o medidor no dia 23/05/2023 às 17 h e retirado no dia 02/06/2023 às 9 h. A Figura 3.5 mostra como foi instalado o analisador no sistema.

Figura 3.3: Parâmetros Elétricos do Módulo Utilizado

Hi-MO 5m

LR5-72HPH 525~550M

21.5%
MAX MODULE
EFFICIENCY

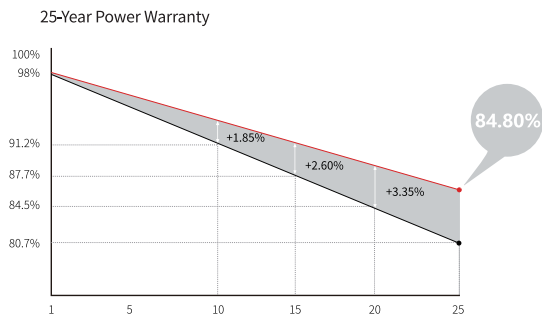
0~+5W
POWER
TOLERANCE

<2%
FIRST YEAR
POWER DEGRADATION

0.55%
YEAR 2-25
POWER DEGRADATION

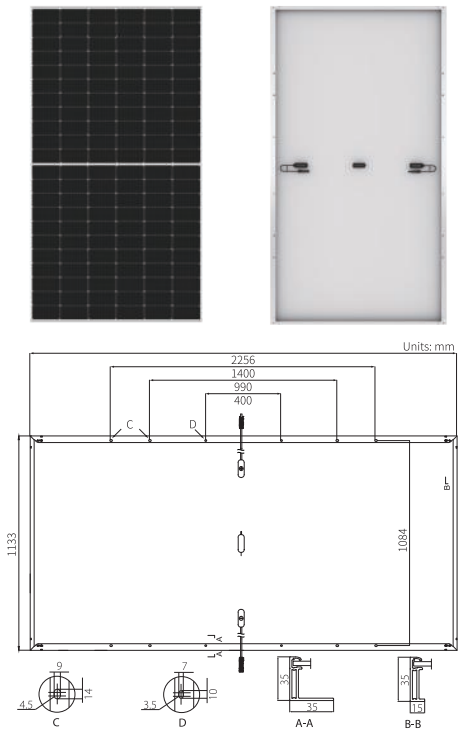
HALF-CELL
Lower operating temperature

Additional Value



Mechanical Parameters

Cell Orientation	144 (6×24)
Junction Box	IP68, three diodes
Output Cable	4mm², positive 400 / negative 200mm length can be customized
Glass	Single glass, 3.2mm coated tempered glass
Frame	Anodized aluminum alloy frame
Weight	27.2kg
Dimension	2256×1133×35mm
Packaging	31pcs per pallet / 155pcs per 20' GP / 620pcs per 40' HC



Electrical Characteristics	STC : AM1.5 1000W/m² 25°C					
	525	530	535	540	545	550
Power Class	525	530	535	540	545	550
Maximum Power (Pmax/W)	525	530	535	540	545	550
Open Circuit Voltage (Voc/V)	49.05	49.20	49.35	49.50	49.65	49.80
Short Circuit Current (Isc/A)	13.65	13.71	13.78	13.85	13.92	13.98
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	41.20	41.35	41.50	41.65	41.80	41.95
Current at Maximum Power (Imp/A)	12.75	12.82	12.90	12.97	13.04	13.12
Module Efficiency(%)	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3	21.5

Operating Parameters

Operational Temperature	-40°C ~ +85°C
Power Output Tolerance	0 ~ +5 W
Voc and Isc Tolerance	±3%
Maximum System Voltage	DC1500V (IEC/UL)
Maximum Series Fuse Rating	25A
Nominal Operating Cell Temperature	45±2°C
Protection Class	Class II
Fire Rating	UL type 1 or 2

Mechanical Loading

Front Side Maximum Static Loading	5400Pa
Rear Side Maximum Static Loading	2400Pa
Hailstone Test	25mm Hailstone at the speed of 23m/s

Temperature Ratings (STC)

Temperature Coefficient of Isc	+0.048%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.270%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.350%/°C



Floor 19, Lujiazui Financial Plaza, Century Avenue
826, Pudong Shanghai, China
Tel: +86-21-80162606
Web: en.longi-solar.com

Specifications included in this datasheet
are subject to change without notice.
LONGi reserves the right of final
interpretation. (20201231V12)

Fonte: Datasheet do fabricante

Figura 3.4: Analisador de Energia Primata P55



Fonte: Fabricante

Figura 3.5: Instalação do Analisador de Energia



Fonte: Autoria própria

Capítulo 4

Apresentação e Análise de Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo, será realizada a análise dos dados adquiridos pelo analisador de energia. Vale ressaltar que a unidade consumidora analisada é uma clínica hospitalar e funciona 24 horas por dia. Devido ao equilíbrio observado entre as fases, optou-se pela utilização do valor médio da fase A para a apresentação dos resultados. Cabe ressaltar que o sistema em estudo não exhibe variações substanciais de frequência ou tensão. Dessa forma, a análise subsequente se concentrará nos resultados relativos ao Fator de Potência e aos Componentes Harmônicos, os quais foram obtidos por meio do levantamento do perfil de geração e consumo de energia.

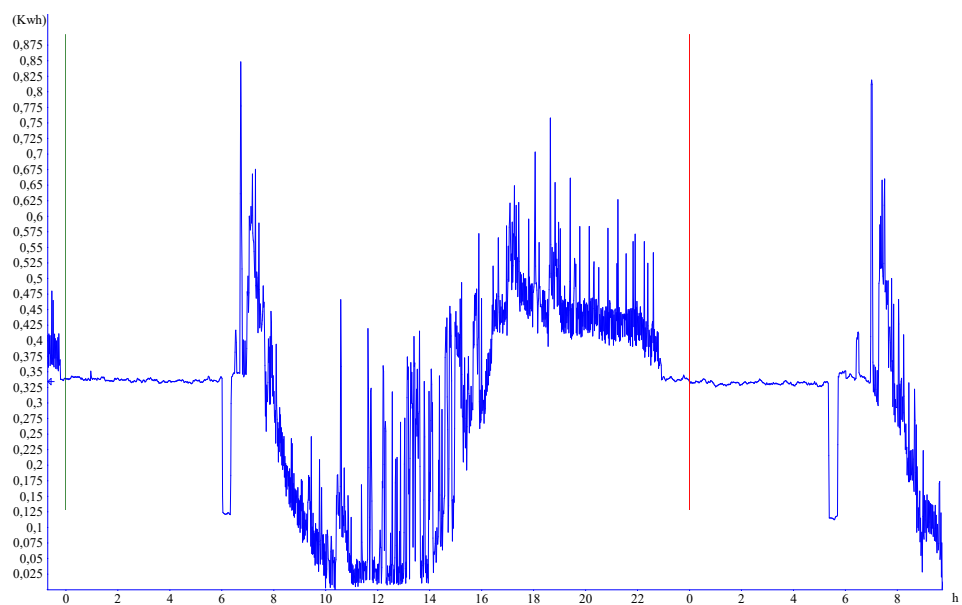
4.2 Análise da Qualidade de Energia Elétrica

4.2.1 Perfil de Consumo do Sistema

Uma análise precisa de QEE requer a identificação do perfil de consumo do circuito proposto. O perfil de consumo do sistema é apresentado na Figura 4.1.

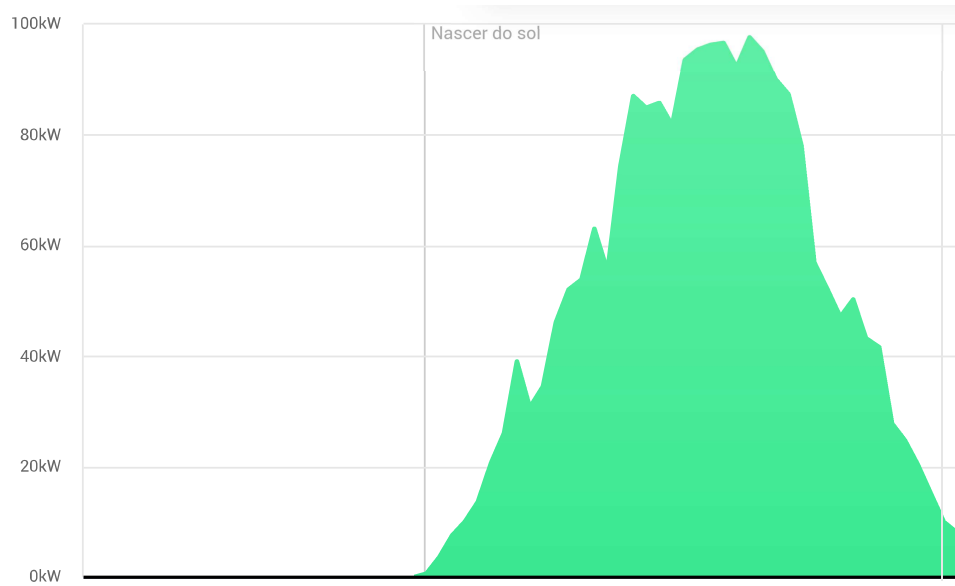
Na Figura 4.2 é evidente a presença de uma curva característica de consumo durante o período noturno, contrastando com a redução do consumo durante o dia. Essa dinâmica é atribuída ao funcionamento eficaz do sistema fotovoltaico, como ilustrado na Figura 4.3, que entra em operação durante o dia, fornecendo a energia consumida. Diante desse cenário, torna-se viável a

Figura 4.2: Consumo Diário dia 23/05/2023



Fonte: Autoria própria

Figura 4.3: Curva de Geração dia 23/05/2023

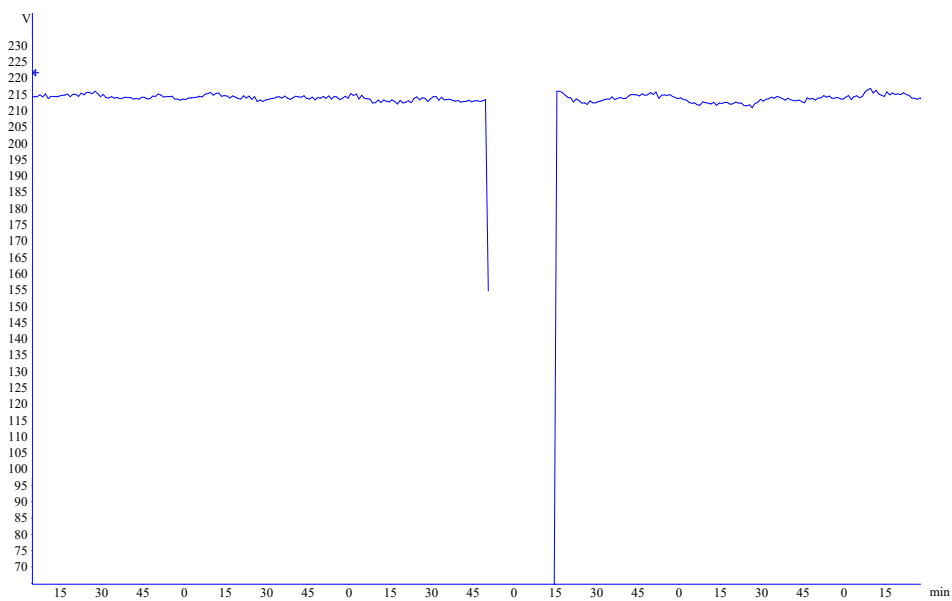


Fonte: Autoria própria

4.2.2 Queda de Fornecimento

Considerando a argumentação apresentada no Capítulo 2, é possível afirmar que a interrupção no fornecimento de energia figura entre os indicadores mais alarmantes de uma má QEE. Tal incidente específico teve lugar no dia 26 de maio de 2023, perdurando por um período de 40 minutos, como evidenciado de forma gráfica na Figura 4.4.

Figura 4.4: Queda de Fornecimento

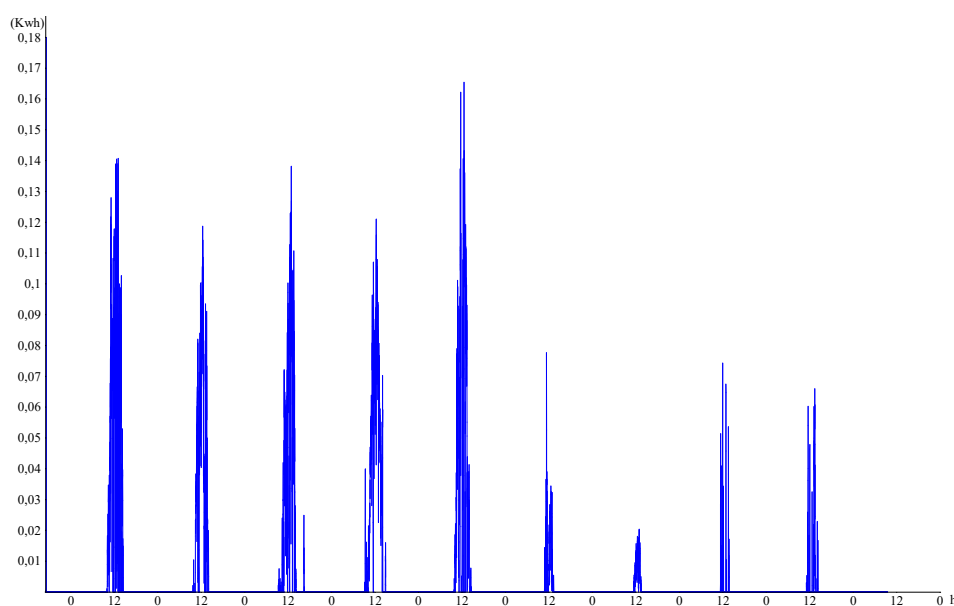


Fonte: Autoria própria

4.2.3 Análise de Injeção de Potência Ativa

Na Figura 4.5, é possível observar a consistência na injeção de potência do sistema fotovoltaico na rede de distribuição de energia. É evidente a redução na geração nos últimos quatro dias da análise, atribuível às possíveis condições climáticas adversas nesse período. Durante dias chuvosos ou com céu nublado, observa-se um sombreamento nos módulos solares, resultando na diminuição da eficiência do sistema.

Figura 4.5: Potência Injetada no Sistema de Distribuição



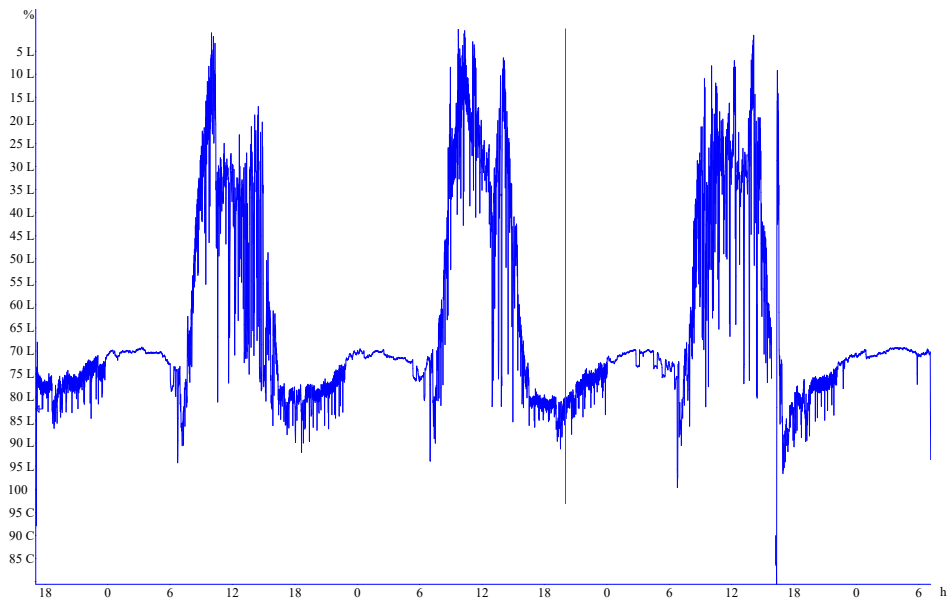
Fonte: Autoria própria

4.2.4 Análise do Perfil de Carga

A análise será feita com e sem gerador fotovoltaico atuando com ênfase no fator de potência. As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 exploram os parâmetros sem o sistema fotovoltaico operando. O fator de potência encontrado no dia 25 de maio de 2023 às 20:00:00 está em 84,18% ou 0,8418 Indutivo (L), fora dos limites definidos pelo PRODIST, que preconiza um valor mínimo de 0,92. Ao avançar na análise, a Figura 4.9 evidencia o comportamento do fator de potência quando o sistema fotovoltaico está em operação.

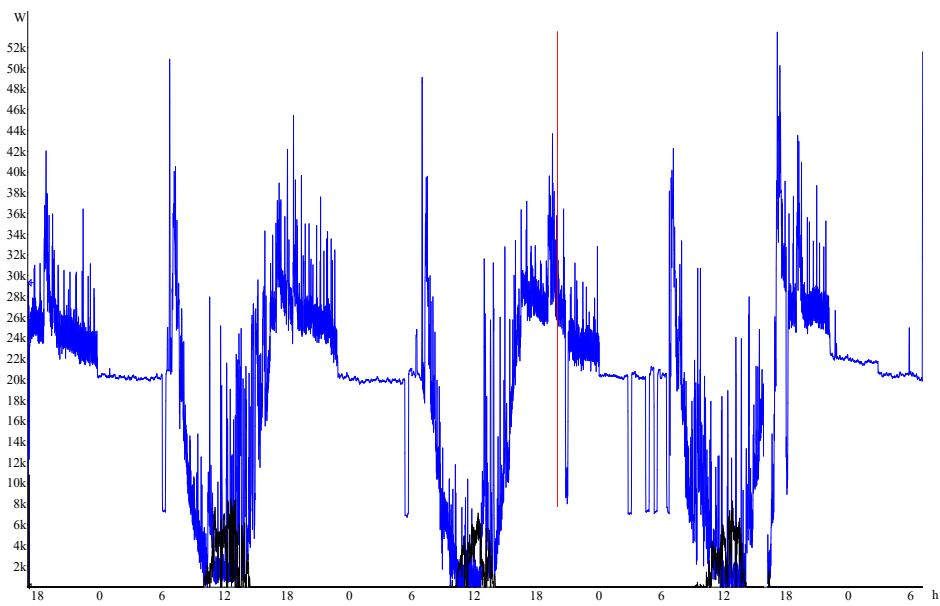
No dia 24 de maio de 2023, às 11:55:23, durante o horário de pico do sistema gerador, as organizações tiveram um fator de potência de 33,57% Indutivo (L). A baixa magnitude desse fator de potência decorre da natureza do sistema fotovoltaico, que contribui apenas com potência

Figura 4.6: Perfil de Carga sem Geração Fotovoltaica (FP)



Fonte: Autoria própria

Figura 4.7: Perfil de Carga sem Geração Fotovoltaica (W)

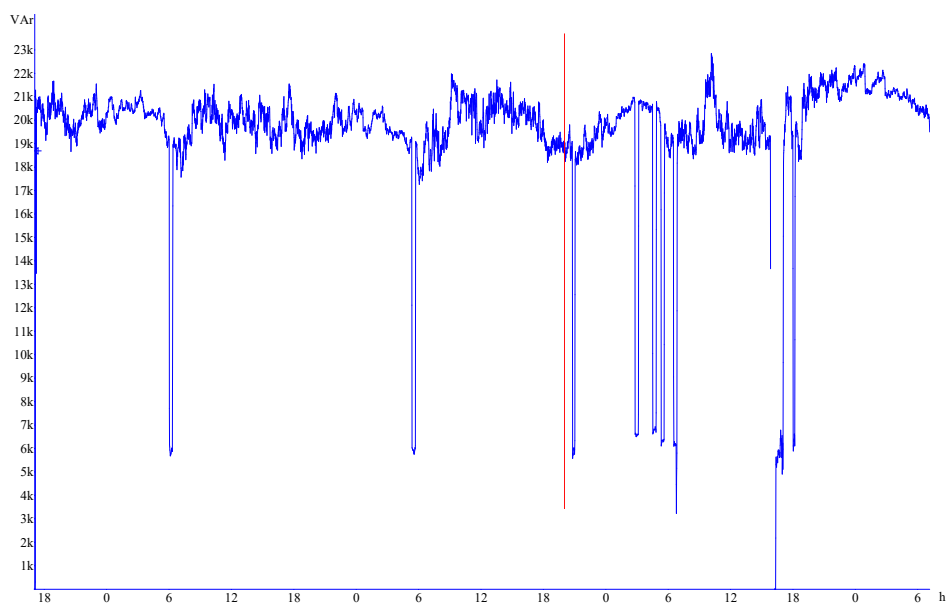


Fonte: Autoria própria

ativa à rede de distribuição. O FP é calculado como a razão entre a Potência Ativa e a Potência Aparente, conforme expresso na Equação (4.1).

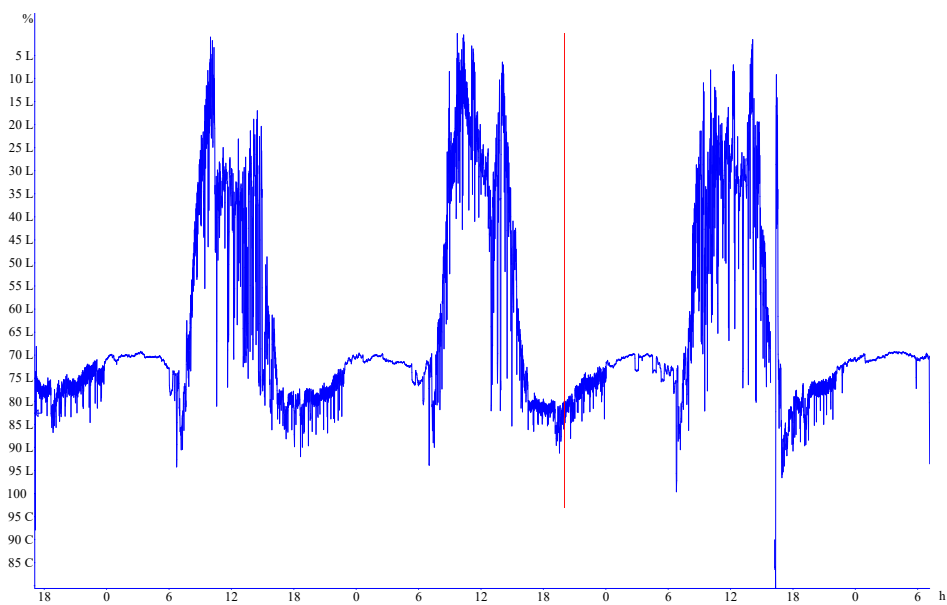
$$FP = \frac{P}{S} \quad (4.1)$$

Figura 4.8: Perfil de Carga sem Geração Fotovoltaica (kVAr)



Fonte: Autoria própria

Figura 4.9: Perfil de Carga com Geração Fotovoltaica (FP)



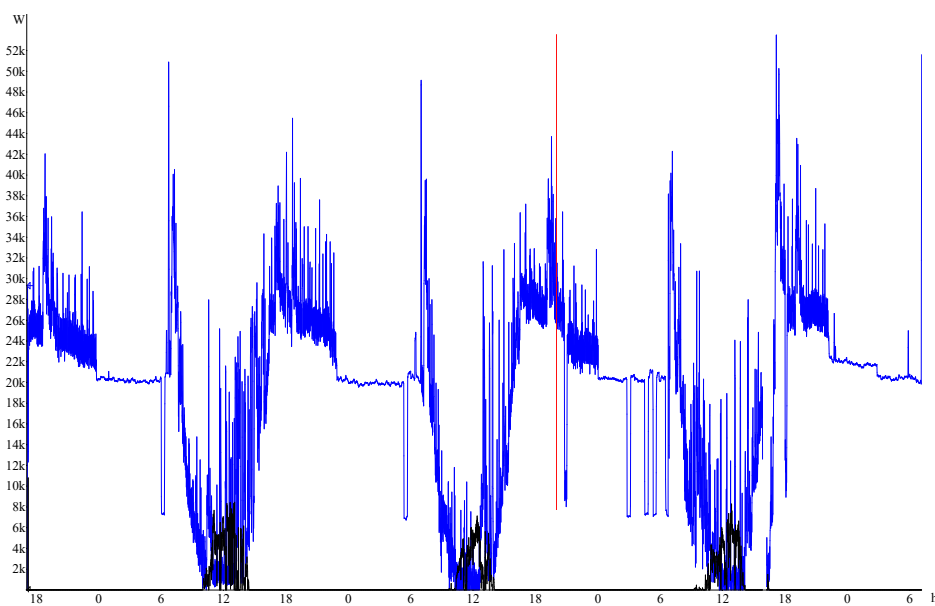
Fonte: Autoria própria

Destaca-se, adicionalmente, na Figura 4.11, a representação visual da linearidade da Potência Reativa, evidenciando que a redução da Potência Ativa resulta em uma redução correspondente no FP.

Sendo;

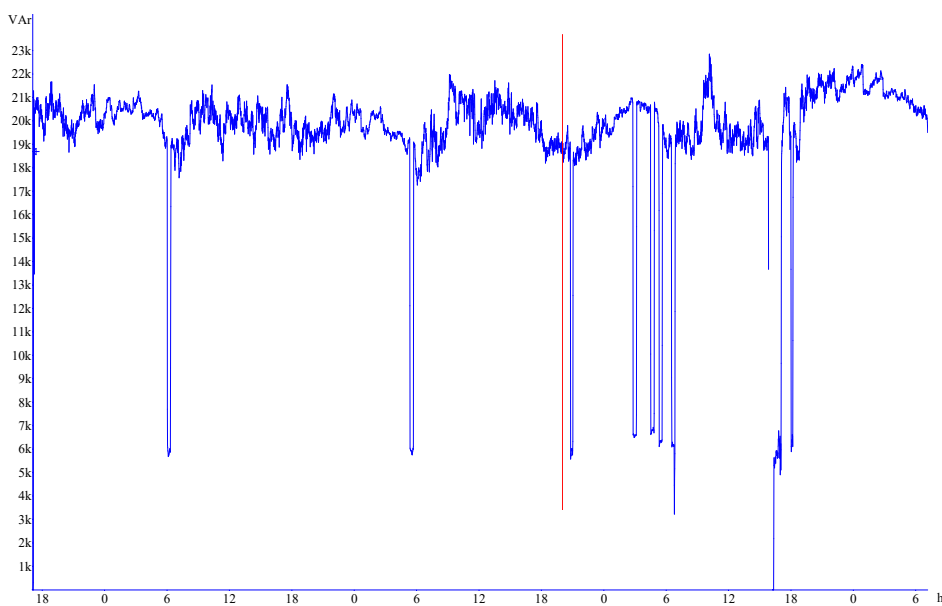
- P = Potência Ativa (W);

Figura 4.10: Perfil de Carga com Geração Fotovoltaica (W)



Fonte: Autoria própria

Figura 4.11: Perfil de Carga com Geração Fotovoltaica (kVAr)



Fonte: Autoria própria

- S = Potência Reativa (kVAr);
- FP = Fator de Potência.

No entanto, torna-se necessária a implementação de um banco de capacitores para atenuar a injeção de Potência Aparente no sistema. Para tal, será empregado o valor médio da Potência Reativa (Q) ao longo da análise. A Reatância Capacitiva é determinada pelo uso da Equação (4.2),

e ao aplicar a Equação (4.3), é possível obter o valor correspondente da Capacitância.

$$X_c = \frac{V^2}{S} \quad (4.2)$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_c} \quad (4.3)$$

Sendo:

$$V = 220 \text{ V};$$

$$f = 60 \text{ Hz};$$

$$Q = 20,97 \text{ kVar};$$

$$C = \text{Capacitância } \mu F;$$

$$X_c = \text{Reatância Capacitiva } \Omega.$$

A escolha da capacitância adequada é crucial, pois ela deve ser dimensionada de acordo com as características específicas do sistema elétrico em questão. O objetivo é compensar a energia reativa e, assim, reduzir as perdas de energia, melhorando a eficiência global do sistema. A partir dos cálculos realizados, a correção do FP será feita por meio de um Banco de Capacitores com uma Capacitância de $114,92 \mu F$.

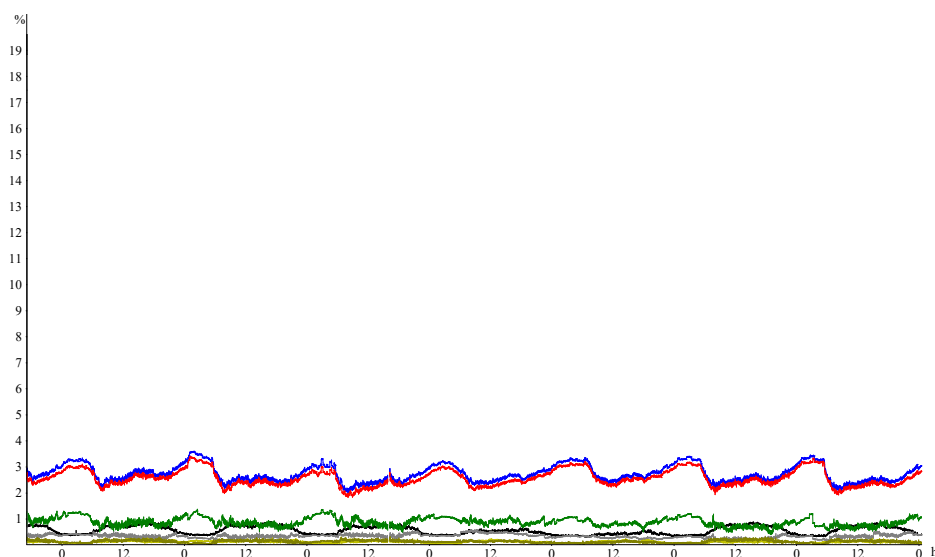
4.2.5 Harmônicos

4.2.5.1 Harmônicos Impares

A avaliação das componentes harmônicas de um sistema é crucial para determinar a extensão da interferência eletromagnética que o sistema está introduzindo na rede. Este fenômeno é ilustrado na Figura 4.12, onde se evidencia a influência das harmônicas e sua relação com o nível de “poluição” gerado pelo sistema.

Verifica-se a presença de uma clara periodicidade no gráfico. Ao segmentarmos a análise das componentes harmônicas, constata-se que durante o período em que o grupo gerador não se encontra em operação, o valor de pico ocorreu no dia 25 de maio de 2023, às 01:03:42. Por outro lado, quando o sistema está em geração, o valor de pico foi observado também no dia 25

Figura 4.12: Componentes Harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª e DHT Impar



Fonte: Autoria própria

de maio de 2023. Os resultados detalhados desta análise são apresentados a seguir na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultados do Primeiro e Segundo caso

DHT	3,57%	2,753%
Harmônica 5ª	3,405%	2,612%
Harmônica 7ª	1,031%	0,83%
Harmônica 11ª	0,153%	0,149%
Harmônica 13ª	0,035%	0,084%

Fonte: Autoria própria

O sistema em questão está em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo PRODIST, que define um limite para a Distorção Harmônica Total (DHT) de 7,5%. É importante destacar que os resultados obtidos durante o funcionamento do sistema fotovoltaico, em termos de qualidade de energia, demonstraram melhorias significativas. A DHT do sistema fotovoltaico é aproximadamente 33% menor em comparação com o sistema operando em conjunto com a rede da concessionária de energia elétrica.

Esta redução substancial na DHT pode ser atribuída ao fato de que o inversor utilizado no sistema fotovoltaico apresenta uma taxa de DHT inferior a 3%. Esta característica do inversor contribui de maneira significativa para a melhoria da qualidade da energia gerada, resultando em benefícios evidentes quando comparados ao sistema convencional conectado à rede de distribuição.

Essa diferença notável destaca a eficiência do sistema fotovoltaico não apenas em termos de geração de energia limpa, mas também na minimização dos efeitos adversos associados à distorção harmônica. Esses resultados ressaltam a viabilidade e a vantagem técnica do sistema fotovoltaico, não apenas como fonte sustentável de energia, mas também como uma alternativa que contribui para a melhoria da qualidade geral da energia elétrica fornecida.

4.2.5.2 Harmônicos Pares

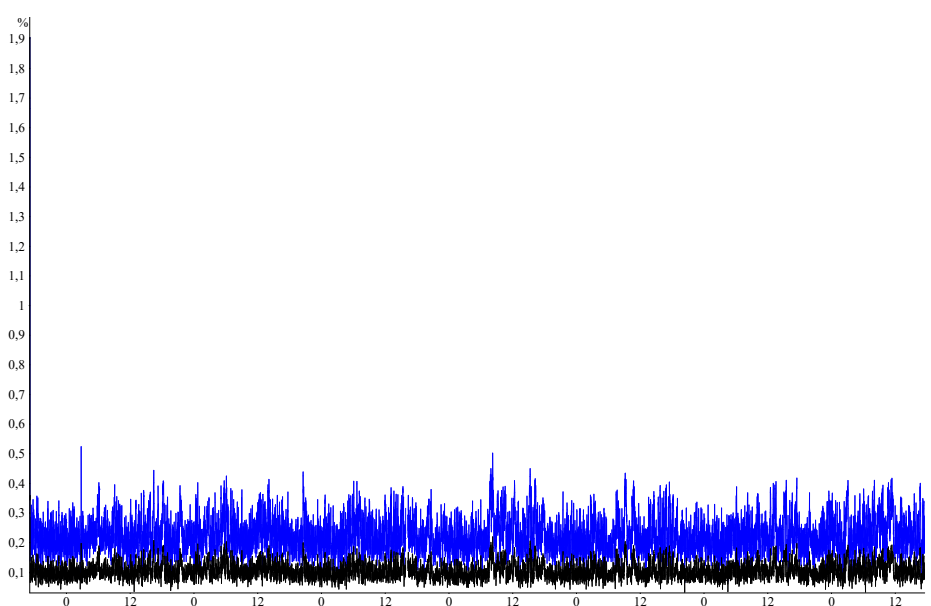
Conforme evidenciado nas Figuras 4.13 e 4.14, é observado um índice reduzido do componente Par no sistema em análise. De acordo com as diretrizes estabelecidas pelo PRODIST, a DHT para o componente Par é estabelecida em 6,5%. No contexto deste estudo, observa-se uma consistência linear nos resultados ao longo dos dias. Os picos de desempenho foram registrados no dia 27 de maio de 2023, às 10:20:28, destacando-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados Harmônicos Pares

DHT	0,644%
Harmônica 2 ^a	0,296%
Harmônica 4 ^a	0,134%

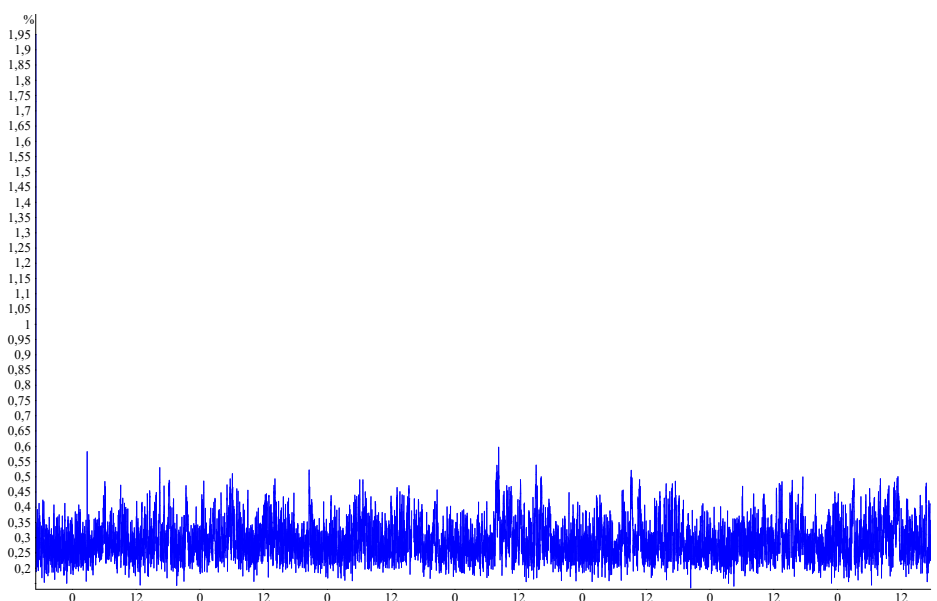
Fonte: Autoria própria

Figura 4.13: Componentes Harmônicas de 2^a e 4^a



Fonte: Autoria própria

Figura 4.14: Componente Harmônicas DHT Par



Fonte: Autoria própria

4.2.5.3 Harmônicos Triplos

Conforme ilustrado na Figura 4.15, é possível notar uma redução no índice do componente triplo no sistema em questão. Em conformidade com as diretrizes estipuladas pelo PRODIST, a DHT para o componente Par é incluída em 2,5%. Vale ressaltar que, durante o período diurno, quando a clínica opera em plena capacidade, o DHT Triplo apresentou um aumento de 54% em relação ao período noturno, quando o estabelecimento registra um fluxo de potência mais baixo.

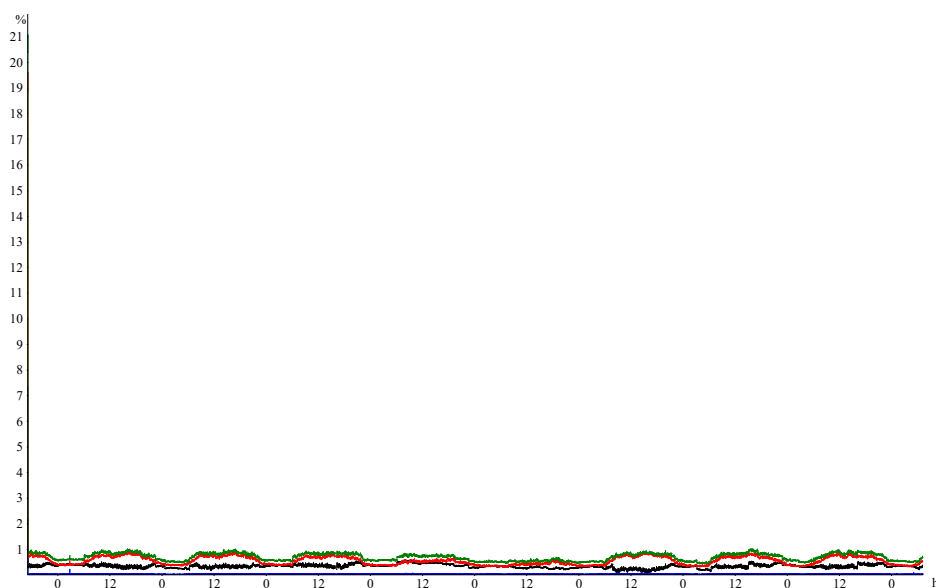
O pico de DHT Tripla ocorreu dia 01 de junho de 2023 as 14:29:28 e o menor valor foi observado no dia 30 de maio de 2023 as 03:52:15. Os resultados estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Resultados Harmônicos Triplos

Componente	01/06/2023	30/05/2023
DHT	1,01%	0,457%
Harmônica 3 ^a	0,85%	0,340%
Harmônica 6 ^a	0,04%	0,025%
Harmônica 9 ^a	0,47%	0,215%

Fonte: Autoria própria

Figura 4.15: Componente Harmônicas de 3ª, 6ª, 9ª e DHT Tripla

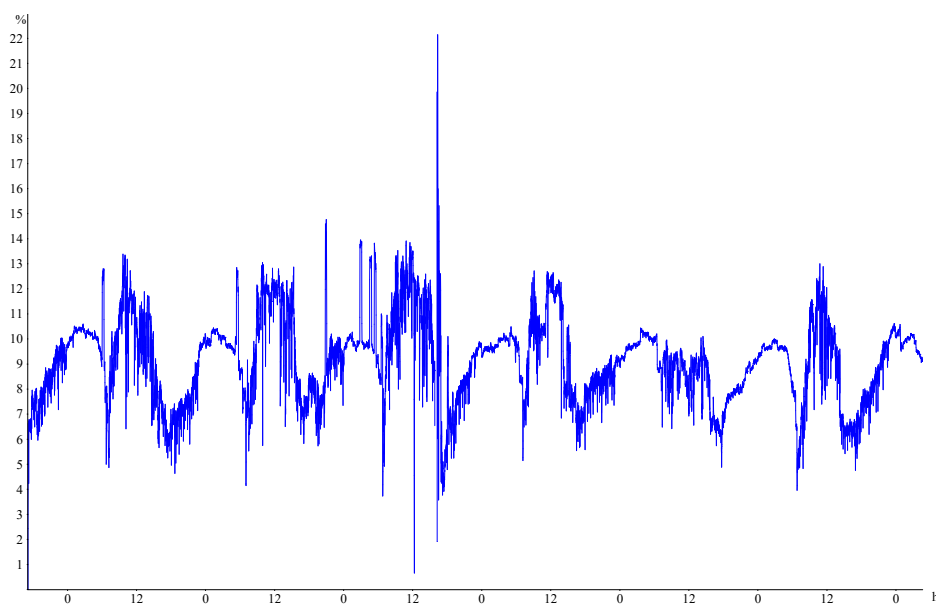


Fonte: Autoria própria

4.2.6 DHT de Corrente

Embora o PRODIST não apresente parâmetros específicos para a DHT de corrente, a norma IEEE 519-2014 [18], intitulada “*IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*”, emerge como uma referência fundamental. Esta norma

Figura 4.16: DHT de Corrente



Fonte: Autoria própria

estabelece diretrizes e limites para o controle de harmônicas de corrente em sistemas elétricos, proporcionando um arcabouço normativo abrangente e reconhecido internacionalmente.

No contexto da análise realizada no sistema em questão, observou-se que o limite estabelecido para a DHT é de 15%. A Figura 4.16 ilustra que o valor médio máximo de DHT de corrente alcançou 9,59%, demonstrando conformidade com as recomendações delineadas pela norma estrangeira. Essa conformidade não apenas ressalta a aderência aos padrões internacionais de qualidade de energia, mas também destaca a eficácia do sistema em controlar e manter a Distorção Harmônica Total de corrente em níveis aceitáveis, promovendo assim um desempenho elétrico consistente e confiável.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 Conclusão Geral

Diante das análises realizadas sobre o consumo, a queda de fornecimento, a injeção de potência ativa, o perfil de carga e a presença de harmônicos no sistema elétrico em estudo, torna-se evidente a complexidade e a interdependência dos fatores que influenciam a QEE. A presença de uma clara periodicidade no consumo noturno, contrastando com a redução durante o dia, reflete o eficaz funcionamento do sistema fotovoltaico, que se destaca como uma fonte de energia limpa e sustentável.

A ocorrência de uma interrupção no fornecimento de energia em 26 de maio de 2023, por 40 minutos, ressalta a importância de garantir a confiabilidade do sistema elétrico. Esses eventos, embora pontuais, têm impacto significativo na percepção da qualidade da energia pelos consumidores.

A análise da injeção de potência ativa revela a consistência do sistema fotovoltaico na contribuição para a rede de distribuição. No entanto, a redução da geração em dias com condições climáticas adversas destaca a necessidade de considerar variáveis ambientais na gestão eficiente do sistema.

A investigação do perfil de carga, especialmente em relação ao fator de potência, indica a influência direta do sistema fotovoltaico, cuja natureza contribui predominantemente com potência ativa. A proposta de implementação de um banco de capacitores para correção do fator de potência destaca a busca por soluções que otimizem a eficiência do sistema elétrico.

A avaliação dos harmônicos, tanto ímpares quanto pares, revela a conformidade do sistema com as diretrizes estabelecidas pelo PRODIST, evidenciando melhorias significativas durante o funcionamento do sistema fotovoltaico. A redução substancial na Distorção Harmônica Total destaca não apenas a eficiência na geração de energia limpa, mas também a minimização dos efeitos adversos associados à distorção harmônica.

Em suma, os resultados obtidos sugerem que o sistema fotovoltaico não apenas se apresenta como uma fonte sustentável de energia, mas também contribui para a melhoria da qualidade geral da energia elétrica fornecida. As análises realizadas fornecem *insights* valiosos para a otimização contínua do sistema, visando atender aos padrões de qualidade e confiabilidade exigidos pelo setor elétrico.

5.2 Trabalhos Futuros

Com opção de linhas de pesquisa e análise para trabalhos futuros, sugere-se:

- Análise de viabilidade financeira para instalação de grupo gerador fotovoltaico em sistemas com baixo fator de potência;
- Otimização da eficiência energética em sistemas fotovoltaicos integrados à rede elétrica;
- Impacto da integração de veículos elétricos na qualidade de energia.

Referências Bibliográficas

- [1] PERES, K. K. Identificação de áreas aptas ao aproveitamento de fontes renováveis de energia elétrica a partir da viabilidade econômica em áreas fragilizadas. 2022.
- [2] ONS. *Carga e Geração*. 2020. Available: <<https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>>. Acesso em: 21 nov 2023.
- [3] GOMES, J. S. et al. Qualidade de energia eléctrica. III Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento. p. 219–231, 2003.
- [4] VILLALVA, M. *conhecendo o inversor solar fotovoltaico por dentro*. 2020. Available: <<https://canalsolar.com.br/conhecendo-o-inversor-solar-fotovoltaico-por-dentro/>>. Acesso em: 21 nov 2023.
- [5] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 2017.
- [6] Urbanetz Junior, J.; RÜTHER, R. Qualidade de energia elétrica e o funcionamento de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 2, n. 1, 2016. ISSN 2178-9606.
- [7] OLIVATTI, C. d. A. Efeito fotovoltaico e fotocondutividade em dispositivos poliméricos. p. 2–6, 2000.
- [8] SEVERINO, M.; OLIVEIRA, M. Fontes e tecnologias de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas. *Energia, Economia, Rotas Tecnológicas: textos selecionados, Palmas, ano*, v. 1, p. 265–322, 2010.
- [9] NASCIMENTO, C. A. do. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. p. 14, 2014.

- [10] CARNEIRO, J. Módulos fotovoltaicos características e associações. *Handbook Of Accelerator Physics And Engineering: Third Edition*, p. 2–6, 2023.
- [11] WILHELM, C.; PRIEB, M. Determinação Da Eficiência De Seguimento De Máxima Potência De Inversores Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede De Distribuição. 2011.
- [12] PEREIRA, O. L. S.; GONÇALVES, F. F. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: Estudo de caso do sistema de Tubarão - SC. *Revista Brasileira de Energia*, v. 14, n. 1, p. 25–45, 2008.
- [13] AYONA, M. *Inversor Solar com 2 MPPT operando com entrada única*. 2020. Available: <<https://canalsolar.com.br/inversor-solar-com-2-mppt-operando-com-entrada-unica/:text=MPPT>>.
- [14] MELO, F. C. Conersores cc-ca - inversores isolados da rede elétrica monofásicos. 2022.
- [15] POMILIO, J. A. Pré-reguladores de fator de potência. *Publicação FEE*, v. 3, p. 95, 2007.
- [16] EMCALI. Tarifas de Energia EMCALI. 2015. Available: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>>.
- [17] FERGÜTZ, M. Correção do fator de potência. *UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina*, p. 4–6, 2016. Available: <https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/9731/correcao_do_fpf516156415100007939731.pdf>.
- [18] IEEE. IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, v. 2014, p. 1–29, 2014. Available: <<http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6826457>>.