

DENISE DA COSTA CANFIELD

AVALIAÇÃO DAS HARMÔNICAS E DAS TENSÕES DE DOIS
SISTEMAS FIXOS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICOS E DE UM
SISTEMA COM RASTREADOR SOLAR DE MINIGERAÇÃO
FOTOVOLTAICA

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
AGOSTO 2022

DENISE DA COSTA CANFILD

AVALIAÇÃO DAS HARMÔNICAS E DAS TENSÕES DE DOIS
SISTEMAS FIXOS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICOS E DE UM
SISTEMA COM RASTREADOR SOLAR DE MINIGERAÇÃO
FOTOVOLTAICA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
AGOSTO 2022

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

da Costa Canfield, Denise
Avaliação das harmônicas e das tensões de dois sistemas fixos de microgeração fotovoltaicos e de um sistema com rastreador solar de minigeração fotovoltaica / Denise da Costa Canfield; orientador Jair Antonio Cruz Siqueira. -- Cascavel, 2022.
120 p.

Dissertação (Mestrado Profissional Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2022.

1. Geração Distribuída. 2. Qualidade de Energia. 3. THD. I. Cruz Siqueira, Jair Antonio, orient. II. Título.

DENISE DA COSTA CANFILD

Avaliação das harmônicas e das tensões de dois sistemas fixos de microgeração fotovoltaicos e de um sistema com rastreador solar de minigeração fotovoltaica.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADO pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a): Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Dra. Maritane Prior

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Dr. Fernando de Lima Caneppele
Universidade de São Paulo (USP)

Cascavel, 29 de agosto de 2022

*Solo le pido a Dios
Que el dolor no me sea indiferente
Que la reseca muerte no me encuentre
Vacía y sola sin haber hecho lo suficiente
Solo le pido a Dios
Que lo injusto no me sea indiferente
Que no me abofeteen la otra mejilla
Después que una garra me arañe esta suerte
Solo le pido a Dios
Que la guerra no me sea indiferente
Es un monstruo grande y pisa fuerte
Toda la pobre inocencia de la gente
Es un monstruo grande y pisa fuerte
Toda la pobre inocencia de la gente
Solo le pido a Dios
Que el engaño no me sea indiferente
Si un traidor puede más que unos cuantos
Que esos cuantos no lo olviden fácilmente
Solo le pido a Dios
Que el futuro no me sea indiferente
Desahuciado está el que tiene que marchar
A vivir una cultura diferente
Solo le pido a Dios
Que la guerra no me sea indiferente
Es un monstruo grande y pisa fuerte
Toda la pobre inocencia de la gente
Es un monstruo grande y pisa fuerte
Toda la pobre inocencia de la gente.*

Mercedes Sosa

AGRADECIMENTOS

Agradeço Aquele que, em seu amor imensurável, concedeu a mim uma segunda chance. Eu bem sei que a segunda chance nunca é nas mesmas condições da primeira, porém eu sempre senti Tua presença em todos os momentos dessa jornada. Estendo meus agradecimentos aos meus Protetores que, em nome do amor legítimo, zelaram por mim, pois agora posso afirmar que meu coração e minha consciência estão quites com a sociedade.

À minha família, mãezinha, paizinho e manos amados! Deus sabe como sou amada por vocês. E, como esperado, foi nos momentos mais difíceis que eu, feito criança que acabara de perder seu brinquedo mais precioso e, conseqüentemente, me vi com meu interior totalmente desestruturado, fui acolhida pela família até que eu restabelecesse minhas energias.

Ao meu tão estimado orientador, pois sem o seu tamanho zelo e dedicação esse trabalho não teria sido realizado. Oh! Benditas as vezes que me dissestes: “Calma, vai dar tudo certo!”. Palavras mágicas que fazem desaparecer as angústias e o desânimo. Com empenho, leu todos os trabalhos enviados, foi a campo para me auxiliar, deu-me orientações, soluções e dicas cruciais que fizeram total diferença no trabalho, respondeu todas as solicitações de auxílio. Orientações sempre muito lúcidas e maduras que me redirecionaram ao eixo novamente, enfim é difícil descrever o quanto fui bem orientada.

Em especial, agradeço ao colega doutorando Cristiano Fernando Lewandoski por viabilizar condições de realizar meu trabalho quando tudo parecia perdido. De uma forma generosa, não esperando que eu solicitasse, adiantando-se e percebendo que me encontrava em situação difícil. Abriu as portas da usina Olímpio e, como não bastasse, homem de caráter proativo, acompanhou-me em todas as visitas de campo. Dedicou seu precioso tempo auxiliando-me nas instalações, discussões e orientações, tudo isto foi tomado por mim com grande valia.

Ao professor Reginaldo que abriu as portas do seu laboratório, sem restrições, com total confiança em mim e no colega de mestrado Leonardo Reis, que me auxiliou com tanta boa vontade nas tarefas de campo, sempre se portando de forma respeitosa e carinhosa.

Aos professores Carlos Eduardo Nogueira e Professor Jair Siqueira por abrir, da mesma forma, as portas do seu laboratório quando eu, que me encontrava em momento de total desalento, fiquei sem acesso ao local da primeira usina que seria inicialmente objeto da minha pesquisa e veio a sofrer avarias naturais atrasando seu processo de execução.

Ao corpo docente da Universidade Estadual do Oeste do Paraná pela contribuição da construção do meu saber.

Aos meus colegas engenheiros e arquitetos da Diretoria de Planejamento Físico – DPF da UNIOESTE Reitoria, principalmente ao meu chefe Eng^o civil Paulo Henrique Gris, que sempre me auxiliou e me motivou a fazer este mestrado, acreditando que, mesmo com o tempo escasso e as obrigações laborais, era possível contribuir com a ciência. Não foram poucas as vezes em que me encontrei sem saída e, esgotada todas as tentativas de soluções, ele tomou para si a causa e contribuiu para que o empreendimento travado fosse solucionado.

Aos meus colegas de mestrado que iluminaram o meu caminho com auxílios, sugestões e confirmam o que sempre acreditei: com o apoio intelectual e fraterno qualquer trabalho se torna prazeroso.

À UNIOESTE por proporcionar aos seus servidores uma política de educação continuada, estabelecendo que o ser humano tem direito ao crescimento, e que um cidadão instruído contribui com o progresso da sociedade.

Ao laboratório LABTES e toda sua equipe pelo apoio nesse trabalho, o respeito e a valorização. Senti-me inclusa e pertencente a ele.

Agradeço os meus atuais e ex-alunos, minhas joias preciosas, que contribuíram com a minha construção profissional por intermédio de suas energias joviais e alegrias, mas, em especial, ao aluno e amigo servidor da COPEL Marcos Lopes, pois em todas as vezes nas quais solicitei ajuda, fui imediatamente atendida. Agradeço também aos engenheiros Guilherme Passos e André Rossi por todas as dúvidas técnicas esclarecidas.

Para finalizar, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo suporte a pesquisa no Brasil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021. Participação das fontes energéticas em porcentagem.....	12
Figura 2 - Projeção da capacidade instalada das microgerações e da minigeração distribuída.....	18
Figura 3 - Forma de onda periódica e suas componentes harmônicas	26
Figura 4 - Sentido das correntes e Ponto de medição PAC	29
Figura 5 (a) e 5 (b) – Função com simetria ímpar.....	40
Figura 6 (a) e 6 (b) – Função com simetria par	41
Figura 7 – Módulos fotovoltaicos importados no segundo semestre de 2020 por volume em MWp.....	45
Figura 8 – Inversores de potência de até 9,9 kW importados no segundo semestre de 2020 por volume em MW.....	45
Figura 9 – Inversores de potência entre 10,0 kW e 49,9 kW importados no segundo semestre de 2020 por volume em MW.....	46
Figura 10 – Inversores de potência acima de 50,0 kW importados no segundo semestre de 2020 por volume em MW.....	46
Figura 11 - Vista aérea - Campus de Cascavel – UNIOESTE.....	47
Figura 12 - Vista aérea - Campus de Cascavel – UNIOESTE.....	48
Figura 13 - Vista aérea – Usina Olímpio – Cidade de Cascavel – PR.....	49
Figura 14 - Analisador de qualidade de energia FLUKE modelo 1738.....	53
Figura 15 - Laboratório do LABTES – Campus Cascavel – UNIOESTE.....	55
Figura 16 – Ponto de coleta dos dados do laboratório LABTES.....	56
Figura 17 - Microgeração fotovoltaica pertencente ao sistema do projeto CASA – Campus Cascavel – UNIOESTE. M.....	56
Figura 18 – Ponto de coleta dos dados do projeto CASA	57
Figura 19 - Minigeração fotovoltaica Usina Olímpio de 2,2 MW localizada na cidade de Cascavel – PR.....	58

Figura 20 - Minigeração fotovoltaica Usina Olímpio de 2,2 MW localizada na cidade de Cascavel – PR.....	58
Figura 21 – Ponto de coleta dos dados do inversor de 100 kW da usina Olímpio	59
Figura 22 – Frequência Média em Hz do inversor do sistema 2 - inversor de 7,5 kW registrado entre o dia 14/05/2022 e 20/05/2022.....	62
Figura 23 – Histograma da THD da tensão e harmônicas até 13ª ordem em percentual em relação a harmônica fundamental – h01 para as fases AN e BN respectivamente do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.....	63
Figura 24 – Potência média em Watts do inversor de 7,5 kW do sistema 1 registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 16/05/2022.....	66
Figura 25 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor de 7,5 kW do sistema 1 registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 16/05/2022.....	67
Figura 26 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor do sistema 1 de 7,5 kW e a potência também em porcentagem registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 16/05/2022.....	68
Figura 27 – Potência média em W do inversor do sistema 1 de 7,5 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 18/05/2022.....	68
Figura 28 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor do sistema 1 de 7,5 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 16/05/2022.....	69
Figura 29 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor e a potência também em porcentagem do sistema 1 de 7,5 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 16/05/2022.....	70
Figura 30 – Histograma da THD da corrente e harmônicas até 13ª ordem em percentual em relação à harmônica fundamental para as fases AN e BN respectivamente do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.....	71
Figura 31 – Frequência Média em Hz do inversor do sistema 2 registrado entre o dia 25/05/2022 e 02/06/2022.....	73
Figura 32 – Histograma da THD da tensão e harmônicas até 13ª ordem em percentual em relação à harmônica fundamental para as fases AN e BN respectivamente do sistema 2 – inversor de 4 kW.....	75
Figura 33 – Potência média em W do inversor do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 27/05/2022.....	77

Figura 34 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor do sistema 2 de 4 kW registrada entre 06:00h às 20:00h no dia 27/05/2022.....	78
Figura 35 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor e a potência também em porcentagem do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 27/05/2022.....	79
Figura 36 – Potência média em W do inversor do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 31/05/2022.....	80
Figura 37 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor do sistema 2 de 4 kW registrada entre 06:00h às 20:00h no dia 27/05/2022.....	80
Figura 38 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor e a potência também em porcentagem do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 31/05/2022.....	81
Figura 39 – Histograma da THD da corrente e harmônicas até 13ª ordem em percentual em relação à harmônica fundamental para as fases AN e BN respectivamente do sistema 2 – inversor de 4 kW.....	82
Figura 40 – Tensão média das fases AN, BN e CN em Vrms durante o ciclo de 24 horas registrado no dia 02/07/2022.....	85
Figura 41 – Frequência Média em Hz do inversor do sistema 3 registrado entre o dia 02/07/2022 e 08/07/2022.....	86
Figura 42 – Histograma da THD da tensão e harmônicas até 13ª ordem em percentual em relação à harmônica fundamental para as fases AN, BN e CN respectivamente do sistema 3 – inversor de 100 kW.....	88
Figura 43 – Potência média em W do inversor do sistema 3 de 100 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 08/07/2022.....	90
Figura 44 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor do sistema 3 de 100 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 08/07/2022.....	91
Figura 45 – Taxa de distorção harmônica da corrente em porcentagem do inversor e a potência também em porcentagem do sistema 3 de 100 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 08/07/2022.....	92
Figura 46 – Histograma da THD da corrente e harmônicas até 13ª ordem em percentual em relação à harmônica fundamental para as fases NA, BN e CN respectivamente do sistema 3 – inversor de 100 kW.....	93

LISTAS DE TABELA

Tabela 1 - Fornecimento total de energia mundial por fonte.....	10
Tabela 2 – Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2021.....	11
Tabela 3 - Evolução da capacidade instalada no setor elétrico brasileiro em (GW)..	13
Tabela 4 - Unidades Consumidoras com GD em setembro de 2019	19
Tabela 5 - Distúrbios elétricos na categoria de eventos.....	23
Tabela 6 - Distúrbios elétricos sustentados.....	24
Tabela 7 - Componentes espectrais de forma de onda de frequência f.....	25
Tabela 8 - Exemplos de forma de onda de correntes distorcida em cargas eletrônicas.....	27
Tabela 9 - Limite de distorções harmônicas de corrente.....	28
Tabela 10 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	30
Tabela 11 - Comparação dos limites da taxa de distorção harmônica individual e total.....	33
Tabela 12 - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (220/127)	43
Tabela 13 - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (380/220)	44
Tabela 14 - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (254/127)	44
Tabela 15 – Módulo solar fabricante Balfar Solar modelo BS72P-330W.....	49
Tabela 16- Inversor do Fabricante Sofar Solar – modelo Sofar 7.5 KTLM	50
Tabela 17 – Módulo solar fabricante Risen Solar Technology modelo RSM72-6-330P.....	50
Tabela 18 - Inversor do Fabricante Solis Solar – modelo Solis 1P4K-4G.....	51
Tabela 19 – Módulo solar fabr. Risen Solar Technology modelo RSM150-8-500M..	51
Tabela 20- Inversor do Fabricante Shenzhen Sofar Solar – modelo Sofar 100KT ...	52
Tabela 21 – Grandezas registradas na fase AN do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.....	60
Tabela 22 – Grandezas registradas na fase BN do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.....	60
Tabela 23 – Frequências registradas no sistema 1 – inversor de 7,5 kW.....	61
Tabela 24 – TDH da tensão na fase AN do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.....	60
Tabela 25 – TDH da tensão na fase BN do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.....	61

Figura 26 – Histograma da THD da tensão e harmônicas até 13ª ordem em percentual em relação à harmônica fundamental – h01 para as fases AN e BN respectivamente do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.....	62
Tabela 27 – TDH da corrente nas fases A e B do sistema 1 – inversor de 7,5 kW...	62
Tabela 28 – Comportamento da corrente, potência ativa e TDH da corrente diária do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.....	63
Tabela 29 – Grandezas registradas na fase AN do sistema 2 – inversor de 4 kW....	70
Tabela 30 – Grandezas registradas na fase BN do sistema 2 – inversor de 4 kW....	70
Tabela 31 – Frequências registradas no sistema 2 – inversor de 4 kW.....	71
Tabela 32 – TDH da tensão registrada na fase AN do sist. 2 – inversor de 4 kW.....	72
Tabela 33 – TDH da tensão na registrada fase BN do sist. 2 – inversor de 4 kW.....	72
Tabela 34 – TDH da corrente nas fases A e B do sistema 2 – inversor de 4 kW.....	73
Tabela 35 – Comportamento da corrente, potência ativa e TDH da corrente diária do sistema 2 – inversor de 4 kW.....	74
Tabela 36 – Grandezas registradas na fase AN do sist. 3 – inversor de 100 kW.....	82
Tabela 37 – Grandezas registradas na fase BN do sist. 3 – inversor de 100 kW.....	82
Tabela 38 – Grandezas registradas na fase CN do sist. 3 – inversor de 100 kW.....	82
Tabela 39 – Frequências registradas no sistema 3 – inversor de 100 kW.....	84
Tabela 40 – TDH da tensão na fase AN do sistema 3 – inversor de 100 kW.....	85
Tabela 41 – TDH da tensão na fase BN do sistema 3 – inversor de 100 kW.....	85
Tabela 42 – TDH da tensão na fase CN do sistema 3 – inversor de 100 kW.....	85
Tabela 43 – TDH da corrente nas fases A, B e C do sist. 3 – inversor de 100 kW.....	86
Tabela 44 – Comportamento da corrente, potência ativa e TDH da corrente diária do sistema 3 – inversor de 100 kW.....	87

CANFIELD, Denise da Costa; Ma. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, agosto de 2022. **Avaliação das harmônicas e das tensões de dois sistemas fixos de microgeração fotovoltaicos e um sistema com rastreador solar de minigeração fotovoltaica.** Professor Orientador: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

RESUMO

A energia é um insumo capaz de mudar os rumos de uma sociedade. Em tempos modernos, é inegável sua relevância para o ser humano, proporcionando qualidade de vida e dignidade. Qualquer nação dedica especial atenção às políticas energéticas, já que a falta de segurança energética pode acarretar problemas que afetam a economia do país, além de colocar em risco a saúde dos seus habitantes, perdas de produção e impactos indesejáveis em quase todos os setores. Mas não basta apenas se preocupar com o abastecimento energético, a qualidade de energia é tão importante quanto seu fornecimento contínuo. Uma das maneiras de garantir segurança energética, é a adoção de fontes alternativas de energia. No Brasil, a energia solar fotovoltaica vem aumentando consideravelmente. A partir de 2012, o consumidor brasileiro também pode ser gerador de energia e injetar o excedente na rede do sistema elétrico. Diante desse fato, este trabalho avaliou duas microgerações fixas fotovoltaicas com inversor de 4 kW e 7,5 kW e uma minigeração com rastreamento solar compostos por inversores de 100 kW, localizado na cidade de Cascavel-PR. Nos resultados desse estudo, percebeu-se que a taxa de distorção harmônica da tensão em todos os sistemas estava dentro do que é recomendado pelo módulo 8 do PRODIST. Por sua vez, no que diz respeito às taxas de distorções harmônicas da corrente, o sistema fixo composto por inversor de 7,5 kW apresentou as menores distorções, basicamente ao nascer e pôr do sol, porém o sistema composto por inversor de 4 kW, além de injetar distorções acima da norma NBR16.149 durante o início e final do dia, também injetou correntes distorcidas acima do recomendado em outros horários. O sistema fotovoltaico com rastreamento solar composto por inversor de 100 kW foi o sistema que obteve os melhores resultados, pois foram intervalos de tempo mais curtos, durante o início e fim do dia, em que o inversor injetou correntes com distorções acima do aceitável. Finalmente, os três sistemas de gerações fotovoltaicos geraram energia com o valor médio da tensão dentro dos limites preconizados por norma. Entretanto, no que se refere aos níveis de tensão, o sistema com rastreador solar, do qual possui inversor de maior potência, nos horários de maior incidência solar, apresentou valores de tensão muito próximo do limite máximo recomendado.

“Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.”

PALAVRAS-CHAVE: Geração Distribuída; Qualidade de Energia, THD.

CANFIELD, Denise da Costa; Ma. State University of Western Paraná, August 2022. **Valuation Valuation of the harmonics and voltages of two fixed photovoltaic microgeneration systems and a system with solar tracker for photovoltaic minigeneration solar tracker system.** Teacher advisor: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

ABSTRACT

Energy, this commodity, capable of changing the course of a society, so present in modern times, It is undeniable its relevance for human beings, providing quality of life and dignity. Any nation pays special attention to energy policies, as the lack of energy security can lead to problems that affect the country's economy, in addition to putting at risk the health of its inhabitants, production losses and undesirable impacts in almost all sectors. But it is not enough just to worry about energy supply, the quality of energy is as important as its continuous supply. One of the ways to ensure energy security is the adoption of alternative energy sources, and in Brazil photovoltaic solar energy has been increasing considerably. From 2012 onwards, the Brazilian consumer can also be a generator of energy and inject the surplus into the electric system network, given this fact, this work involves field research in two fixed photovoltaic microgenerations with 4 kW and 7.5 kW inverter and a mini-generation with solar tracking composed of 100 kW inverters, located in the city of Cascavel-PR. In the results of this study it was noticed that the voltage harmonic distortion rate in all systems was within what is recommended by module 8 of PRODIST. In turn, with regard to the harmonic distortion rates of the current, the fixed system composed of a 7.5 kW inverter presented the smallest distortions, basically at sunrise and sunset, but the system composed of a 4 kW inverter in addition to injecting distortions above the NBR16.149 standard during the beginning and end of the day, it also injected distorted currents above the recommended at other times. The photovoltaic system with solar tracking composed of a 100 kW inverter was the system that obtained the best results, as there were shorter time intervals, during the beginning and end of the day, in which the inverter injected currents with distortions above acceptable. Finally, the three photovoltaic generation systems generated energy with the average value of the voltage within the limits recommended by the norm, however, with regard to voltage levels, the system with solar tracker, which has a higher power inverter, at times of higher solar incidence, presented voltage values very close to the maximum recommended limit.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001."

KEYWORDS: Distributed Generation; Power Quality, DHT.

SUMÁRIO

1. TRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivos geral.....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Importância da Energia Elétrica na Sociedade e Uso das Fontes Energéticas.....	5
2.2. Energia Renováveis.....	8
2.3. Consumo Energético.....	9
2.3.1. Consumo Energético por Fontes Energéticas.....	10
2.4. Matriz Elétrica Brasileira e a Energia Solar.....	11
2.5. Sistema Fotovoltaico.....	14
2.5.1. Células Fotovoltaicas.....	14
2.5.2. Inversores Fotovoltaicos.....	16
2.6. Geração Distribuída - GD.....	17
2.6.1. Fluxo reverso.....	20
2.6.2. Geração Distribuída Fotovoltaica.....	20
2.7. Tipos De Cargas.....	21
2.8. Qualidade De Energia Elétrica - QEE.....	22
2.8.1. Perturbações Elétricas.....	22
2.9. Harmônica e Distorção Harmônica.....	25
2.10. Normas e Recomendações.....	27
2.10.1. Normas e Recomendações Nacionais.....	28
2.10.2. Normas Internacionais.....	31
2.11. Distorção Harmônica Total – THD ou <i>Total harmonic distortion</i> - TDH.....	34
2.12. Distorção Harmônica Individual.....	35
2.13. Medição de Harmônicas.....	36
2.14. Fontes de Harmônicas.....	36
2.15. Efeitos das Harmônicas.....	37
2.15.1. Corrente no Neutro.....	38
2.16. Série de Fourier.....	38
2.16.1. Simetria do sinal.....	40
2.16.2. Componente CC.....	41
2.17. Transformada de Fourier.....	41

2.18. Variação da Frequência	42
2.19. Tensão.....	43
2.20. Inversores e Módulos Fotovoltaicos no mercado brasileiro	44
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1. Localizações dos Experimentos.....	47
3.2. Características Técnicas dos Sistemas.....	49
3.3. Analisador de Energia	52
3.4. Método da Aquisição de Dados	54
3.1.1. Dados do sistema fotovoltaico 1 – Laboratório do LABTES	55
3.1.2. Dados do sistema fotovoltaico 2 - Laboratório do Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia - Projeto CASA.....	56
3.1.3. Dados do sistema fotovoltaico 3 – Minigeração fotovoltaica Usina Olímpio de 2,2 MW localizado na cidade de Cascavel - PR	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5. CONCLUSÕES.....	95
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

1. TRODUÇÃO

A população mundial é de aproximadamente 7,8 bilhões de pessoas, porém apenas 6,6 bilhões têm acesso à eletricidade, sendo cerca de 1 bilhão de pessoas ou não o têm ou possuem acesso limitado à eletricidade. Além disto, boa parte da energia no planeta é oriunda de combustíveis fósseis¹ como gás, carvão e petróleo, que são as principais causas do aquecimento global. Para garantir o abastecimento de energia e, ao mesmo tempo, contribuir com a redução dos gases de efeitos estufas², muitos países estão optando por aderir ao uso de fontes alternativas de energia. Entre essas fontes, destaca-se a energia solar fotovoltaica, por se tratar de uma fonte com baixa emissão de gases e com vida útil entre 20 a 25 anos (PÉREZ, 2019).

A energia solar, uma das fontes alternativas de energia, ainda é pouco utilizada, embora o custo da energia gerada esteja diminuindo e a eficiência global dos sistemas fotovoltaicos (FV) venha aumentando, o que torna uma fonte altamente atraente já que o acesso à tecnologia FV e a otimização dos equipamentos envolvidos têm impulsionado o crescimento da produção mundial (PINTO; SILVA FILHO; MACHADO, 2020).

As fontes alternativas de energia, especificamente a energia solar fotovoltaica, podem ser empregadas por meio da Geração distribuída GD como alternativa à expansão do sistema elétrico brasileiro, com a vantagem de estar próxima dos centros consumidores, favorecendo o uso racional de energia, já que a parcela de perdas na transmissão e distribuição são reduzidas a valores menores se comparado ao sistema centralizado de geração de energia.

Silva *et al.* (2018b) destacam que a GD pode trazer muitas vantagens à sociedade, uma vez que suprime, de modo efetivo, o crescimento da demanda energética, além de promover a diminuição de falhas deste. Por outro lado, existem

¹ Os combustíveis fósseis participavam de 69,62% da Geração Elétrica Mundial em 1980, passando a 66,5% em 2010 e 64,2% em 2017, conforme relata EPE (2020). Nestes largos 37 anos, apesar dos alertas da comunidade científica por meio de conferências ambientais a respeito do uso de fontes energéticas de origem fósseis seu emprego diminuiu insignificamente.

² “Estima-se que 69% das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEEs) no mundo sejam oriundas da queima de combustíveis fósseis” (GONÇALVES, 2018, p.1).

desvantagem na adoção indiscriminada de GD, ou seja, na falta de Normas técnicas mais esclarecedoras no que diz respeito à injeção de energia de origem GD no sistema, podem prejudicar a proteção do sistema, aumentar de tensão de forma não desejada e aumentar no conteúdo harmônico injetado no sistema elétrico (SILVA *et al.*, 2018a).

O Brasil, perante demais nações como China, Alemanha, Estados Unidos, entre outros, possui baixo potencial de sistema fotovoltaica instalada, apesar de possuir estimativa de crescimento (GASPARIN *et al.*, 2022). Sabendo que o sistema elétrico brasileiro foi planejado com fluxo de potência unidirecional, ou seja, esse fluxo se comporta da fonte geradora ao consumidor, ao entrar em operação a partir da adoção do sistema GD a injeção de energia excedentes no sistema elétrico de potência (SEP) pode impactar a qualidade de energia, segurança e proteção.

Para Santiago, Guerra e Vale (2018), existem dificuldades técnicas encontradas no que diz respeito ao Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), sendo que todo sistema de micro ou minigeração conectado à rede deve obedecer a alguns critérios de qualidade de energia, previsto em normas técnicas nacionais e internacionais e recomendações técnicas da ANEEL. Beliski, Scarabelot e Rampinelli (2018) complementam esclarecendo que, quando se detectam distúrbios na qualidade de energia, este fato pode causar interrupção no fornecimento de energia, níveis de tensão fora do padrão, oscilações de tensões e frequência, distorções harmônicas de corrente e tensão, ruídos, transitórios entre outros problemas de ordem elétrica.

Sendo a energia o insumo presente em quase todos os setores de produção de bens e serviços que servem à sociedade e perante as novas tecnologias e tendências adotadas na geração de energia, seja centralizado ou distribuído, as múltiplas origens das fontes energéticas em um sistema acabam impactando na qualidade de energia que, muitas vezes, sob a ótica do consumidor é difícil de analisar quais são as condições que a energia está sendo ofertada. Em muitos casos, os danos provocados pela má qualidade e pela falta de energia, mesmo que momentânea, pode superar o custo do fornecimento de energia, principalmente quando é de forma inesperada. Logo, preocupar-se com

a Qualidade de Energia Elétrica - QEE é tão importante quanto se preocupar com a segurança energética³ de um país.

Dentre as anomalias encontradas na energia elétrica, destaca-se as distorções harmônicas que geralmente são oriundas de cargas não lineares composto por semicondutores, tão presentes nos dispositivos eletrônicos e materiais elétricos. Dependendo da magnitude destas distorções, poderá ocorrer prejuízo ao bom funcionamento dos motores, equipamentos eletrônicos, aparelhos de medição, relés de proteção e transformadores, dentre outras cargas.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos geral

Este trabalho tem o objetivo geral avaliar a qualidade de energia QEE por intermédio da presença de distorções harmônicas provocadas por sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de energia de duas microgerações fotovoltaicas fixas localizado no campus de Cascavel da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, sendo a primeira com potência de 7,5 kW e a segunda com potência de 5 kW e uma minigeração fotovoltaica com rastreamento solar de 2,2 MVA localizados na cidade de Cascavel, sendo que os sistemas são compostos com inversores de diferentes marcas, modelos e potência e módulos fotovoltaicos compostos por células de diferentes marcas modelos e potência.

³ A segurança energética envolve questões de eficiência energética, autossuficiência em energia e o acesso às múltiplas fontes de suprimento energético, assim como o foco sobre a produção, distribuição, armazenamento, em especial no setor elétrico por meio de um conjunto de medidas preventivas, regulatórias e afirmativas a fim de estabelecer um equilíbrio entre a sobrevivência dos atores e as expectativas de ordem do sistema (SIQUEIRA, 2010).

1.1.2. Objetivos específicos

Analisar para cada configuração de módulos das microgerações e da minigeração de energia fotovoltaico compostos por inversores e células fotovoltaicas de diferentes marcas, modelos e potência a presença e a taxa de distorção harmônica de corrente e tensão no ponto comum de conexão entre a fonte, bem como os valores de frequência, tensão e potência ativa registrados nesses sistemas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Importância da Energia Elétrica na Sociedade e Uso das Fontes Energéticas

A Energia é um dos vetores básicos de infraestrutura para o desenvolvimento humano e o acesso à energia elétrica é requisito básico de cidadania. Sem ele, o indivíduo fica às margens do desenvolvimento. A energia elétrica é uma forma secundária de energia capaz de transformar em outras formas de energia, sendo que sua viabilidade se dá por ser mais segura, flexível, com tecnologia dominada, fácil integração a novas tecnologias e com vantagens de poder ser usada de forma descentralizada, entre outras vantagens (REIS; SANTOS, 2014).

O ser humano sempre precisou de energia para sobreviver, sendo que nos primórdios só conhecia energia da força muscular usada para o próprio sustento. A partir da era do homem caçador, aproximadamente 100 mil anos até o século XVIII, o recurso energético mais importante foi a madeira que era utilizada como fonte de calor, cozimento de alimentos e afugentar animais. Mais tarde também serviu como fonte térmica para obtenção de carvão vegetal, combustíveis nas indústrias de refino e formatação de utensílios de metais, cerâmica, tinturas, vidraçarias, cervejarias e outros (REIS; FADIGAS; CARVALHO 2012).

A energia eólica já era empregada há pelo menos 1.000 A.C. Os Romanos, Egípcios e Fenícios já adotavam na navegação e há registros de máquinas que utilizam a força dos ventos datado no ano de 644 A.C. tanto na China quanto na Pérsia. Nessas regiões, foram empregados moinhos de ventos para moagem de grãos e irrigação por meio de bombeamento, sendo que mais tarde, no século XIII, essas máquinas foram levadas à Europa. Entretanto, foram os holandeses, mais precisamente em 1350 D.C. os responsáveis por aprimorar eficiência do moinho e empregá-lo em tarefas árduas de drenagem de pântanos e lagos, além da fabricação de papel e extração de azeites (FARIAS, 2011).

Entretanto, mesmo com os avanços tecnológicos a partir da adoção de moinhos com força animal ou hidráulica não substituiu a grande dependência da mão de obra escrava que, infelizmente, foi amplamente adotada até metade do século XIX (TESSMER, 2013).

Quando a madeira passou a ficar escassa, principalmente na Inglaterra e França no século XVI, o carvão mineral foi seu substituto direto e o primeiro combustível usado em grande escala. No entanto, neste período o carvão era utilizado apenas para fins de aquecimento. Em 1698, com a invenção da primeira máquina a vapor por Thomas Savery, houve o emprego da técnica de conversão da sua energia em força mecânica (SIMIONI, 2011).

O uso do carvão, até 1961, foi a principal fonte primária até ser ultrapassada pelo petróleo, que também era conhecido desde a antiguidade, mas foi na Pensilvânia EUA, em 1859, que teve a primeira exploração comercial (FARIAS, 2011).

No Brasil, na década de 1860, foi iniciada a procura por fontes de petróleo, mas durou quase 70 anos até que se conseguisse encontrar a primeira jazida (MORAES, 2013). O impulso do petróleo se deu devido à indústria automobilística que necessitava de uma fonte energética fácil de transportar, sendo que o primeiro derivado foi a querosene empregado para iluminação, substituindo o gás hulha vindo do carvão mineral e óleos de animais, como o de baleia. Contudo, foi a partir de 1913 que surgiram o diesel e a gasolina (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2012).

A eletricidade se destaca como uma das principais inovações do século XIX, e a primeira usina foi em corrente contínua construída por Thomas Edison em 1882. No que diz respeito à central hidrelétrica, a primeira do mundo foi instalada nas Cataratas do Niágara em 1886 (FERRÃO, 2017).

O gás natural, que também era conhecido na antiguidade, só passou a ser difundido com a descoberta do petróleo nos EUA que, a partir do século XX, era utilizado na produção de eletricidade, mas só na década de 1950 ele foi adotado em outras regiões do mundo (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2012).

A energia nuclear⁴, por sua vez, foi empregada como fonte para eletricidade após a Segunda Guerra mundial, principalmente por países que não possuíam reservas petrolíferas (FARIAS, 2011). Reis e Santos (2014) explicam que, na década de 1970, a energia nuclear foi vista como uma das principais alternativas para geração de energia elétrica, o que de fato não ocorreu devido aos desastres

⁴ Embora seja considerada uma fonte limpa, é importante ressaltar que se trata de uma fonte energética não renovável.

nas usinas e o problema do lixo atômico. Já Paul *et al.* (2021) concluíram que na União Europeia, por exemplo, a taxa de consumo de energia nuclear está caindo por dois anos consecutivos em comparação com o nível de 10 anos atrás.

Após a primeira guerra mundial (1914-1918), o conhecimento científico de projeto de turbinas eólicas deu um grande salto, em partes baseado na experiência de projetos de hélices para aviões militares e civis. Com o início da segunda guerra mundial, apenas os EUA continuaram desenvolvendo estudo sobre turbinas eólicas durante a guerra, mas infelizmente foi detectado que os custos de geração eram 50% mais altos que o custo da geração energia convencional. Com a reconstrução da Europa após a segunda guerra mundial e a percepção que as reservas de carvão estavam diminuindo, então, em 1950 surgiu novamente o interesse em aplicação em energia eólica (GASH; TWELE, 2012). Para Umayá *et al.* (2013), a geração de energia eólica começou a ser difundida no final dos anos 1990, liderada pela Dinamarca e seguida pela Alemanha e Espanha resultando em ampla disseminação nos países de toda a Europa.

O álcool como combustível é usado há muito tempo, inclusive durante a segunda guerra mundial. A quantidade de energia disponível por volume torna o álcool um substituto natural do petróleo (BUENO; PIRES, 2006). Em novembro de 1975, o governo brasileiro lançou um dos mais arrojados planos energéticos de combate a crise do petróleo de 1973, ou seja, o Programa Brasileiro de Álcool – Proálcool, gerado exclusivamente com motivações econômicas, pois Correia (2007) esclarece que o programa, além de reduzir a dependência energética do exterior, também funcionava como uma válvula de escape da indústria açucareira.

Diante dos fatos expostos, é perceptível que as políticas energéticas brasileiras sofrem influência direta do mercado mundial, o que torna mais complexa a adoção, de fato, de medidas de sustentabilidade. Mesmo que Brasil, no século passado, ter empregado políticas renováveis, os motivos não foram pautados em preocupações ambientais ou sociais, mas sim em motivos econômicos, tanto que a variação do percentual de álcool adicionado à gasolina não seguiu uma lógica técnico-científica, mas oscilava conforme o mercado internacional do petróleo e dos derivados de açúcar.

Independentemente de quais foram as motivações que fizeram o país optar por substituir parcialmente o combustível de derivado de petróleo por

biocombustível, a sociedade brasileira se beneficiou com a redução de emissão de gases na atmosfera.

No Brasil, quando não há, no caso dos transportes, adesão de uso de 100% de álcool como combustível, existe a presença percentual de álcool misturado com a gasolina, que atualmente são de 27% na gasolina comum e 25% na gasolina premium, conforme Petróleo do Brasil S.A. – PETROBRÁS (2015).

Bueno e Pires (2006) e Bragion e Santos (2012) completam informando que em alguns países são adicionadas proporções muito menores como, por exemplo, nos EUA o álcool é de 3% do total da gasolina. Na Tailândia e Colômbia, são 10%, já na Venezuela e Índia são 5%, enquanto a China dilui vários percentuais chegando a 10%, de qualquer forma, nenhuma outra nação dilui um percentual de álcool na gasolina em quantidades similares ao Brasil.

A respeito da energia solar, o primeiro registro do efeito fotovoltaico aconteceu em 1839 quando o físico francês Alexandre Edmond Becquerel verificou que a exposição à luz solar de eletrodos de platina ou de prata dava origem a uma diferença de potencial, mas a aplicação comercial das células fotovoltaicas só aconteceu nos finais do século XIX, pelas mãos do engenheiro alemão Werner Siemens. Entretanto, a primeira placa fotovoltaica de silício constituída pelo material mais comum empregado até hoje, se deu em 1941 por meio do engenheiro estadunidense Russell Shoemaker Ohl (SANTIAGO, 2019).

Inicialmente, percebeu-se que a fonte de energia fotovoltaica possuía alto custo de produção. Assim sendo, suas primeiras aplicações ficaram restritas aos sistemas de telecomunicações instalados em localidades remotas e, principalmente, em programas espaciais norte-americanos realizados na década de 1970, fomentada pela guerra fria (SANTIAGO, 2019).

2.2. Energias Renováveis

A demanda por energia no planeta deverá aumentar em 65% até o ano de 2030, usando 2004 como o ano base. Sendo a maior parte das fontes energéticas de origem não renováveis, que são conhecidas por causar problemas sérios incluindo emissões de gases de efeito estufa GEE, bem como contribuir com o aquecimento global. Ao contrário dos combustíveis fósseis, as fontes de energia

renováveis fornecem proteção ambiental⁵, um ambiente livre de poluição, segurança energética e benefícios econômicos, sendo que o emprego das energias solar e eólica, duas das mais promissoras formas de fontes de energia renovável, vem aumentando em todo o mundo (QAZI *et al.*, 2019).

O Brasil é líder mundial no uso de energias renováveis. Foi o primeiro país a começar a usar combustível de biomassa e se tornou maior produtor e consumidor deste combustível. A participação de energias renováveis brasileira continua crescendo, e está em oitavo lugar no *ranking* mundial de energia eólica em capacidade instalada. Além disto, o Brasil também se comprometeu a desenvolver combustíveis alternativos e se tornou um líder em biocombustíveis líquidos (PAUL *et al.*, 2021).

2.3. Consumo Energético

A dependência que o homem tem da energia é inegável. Entretanto, no mundo, o consumo de energia cresceu mais rapidamente que a população (LEITE, 2011). Mesmo assim, na década de 60, a oferta de recursos energéticos foi abundante e as tarifas, que eram consideradas baixas. Apesar disto, nem todas as pessoas tinham acesso a esses energéticos (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2012).

Dois fatos na década de 1970 mudam o cenário mundial, são elas: as crises do petróleo de 1973 e de 1979. Neste período, a humanidade percebe que os recursos energéticos não são inesgotáveis. Ademais, o planeta não está mais suportando o crescimento populacional, pois, segundo as Nações Unidas, a população atual de 7 bilhões poderá alcançar 9 bilhões em 2050 e 10 bilhões em 2100 (FERRÃO, 2017).

O aumento da população requer diretamente a elevação do consumo de energia, bem como a ausência ou pouca adoção de medidas de conservação de energia, que ajuda a conter o aumento da exploração de recursos energéticos. Pode-se afirmar que ocorrerá o aumento dos impactos ambientais, sendo que a

⁵ A energia hidrelétrica é considerada renovável e limpa, porém possui impactos ambientais causados por o alagamento de áreas e emissão de metano (CH₄) devido à degradação anaeróbica de material orgânico submerso por inundações (FERREIRA *et al.*, 2018).

magnitude deste aumento vai depender do percentual de cada fonte no *mix* energético, sendo que este *mix* é representado por meio da matriz energética⁶ (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2012).

Ehsanul (2018) ressalta estudos que mostram a recuperação econômica, principalmente nos países em desenvolvimento. A demanda energética tendeu a crescer e, em 2018, antes da pandemia mundial do covid-19, estes estudos sugeriram que o consumo energético nos países em desenvolvimento poderia ultrapassar o consumo energético dos países desenvolvidos no prazo de duas décadas no atual século.

2.3.1. Consumo Energético por Fontes Energéticas

Não há dúvidas sobre as vantagens relevantes das energias renováveis quando comparadas com as energias não renováveis, embora muitas nações tenham, em suas matrizes energéticas, forte predominância de energias de origem fóssil, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Fornecimento total de energia mundial por fonte

Fonte	Participação em %
Carvão	13,2
Gás	30,6
Nuclear	9,60
Hidráulica	2,60
Outros ⁷	3,40
Biocombustível e resíduo	6,60
Petróleo	34,00
TOTAL	100,00

Fonte: IEA (2021).

⁶ Matriz energética elenca todas as formas de energia e sua cadeia energética, ao longo do tempo, organizada de forma quantitativa e ordenada (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2012).

⁷ Inclui geotérmica, solar, eólica, maré/onda/oceno, calor e outras fontes.

O fornecimento mundial de energia, conforme a Tabela 1, indicou que, em 2020, 87,40% da energia total fornecida foi obtida por energias não renováveis, sendo que, deste total, o gás natural sozinho contribui com 30,6%. Por outro lado, as energias renováveis contribuíram com apenas de 12,60%. Se for levada em consideração as promissoras energias eólicas e solar, sua participação ainda é mais tímida, pois é inferior a 3,40% de toda energia fornecida, visto que esse valor vai além da energia solar e eólica, ou outras fontes como geotérmicas e ondomotriz.

O Brasil, por sua vez, no mesmo ano teve em sua matriz energética uma expressiva participação das energias renováveis em comparação com a matriz energética mundial, segundo a Tabela 2. No caso brasileiro, o total de energia não renováveis foi bem inferior ao panorama mundial, isto é, a participação dessas fontes foi de 55,3% e as fontes renováveis chegaram a 44,70%, praticamente 3,5 vezes maior que o fornecimento mundial.

Tabela 2 – Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2021

Fonte	participação em %
Carvão	5,60
Gás Natural	13,30
Petróleo e derivados	34,40
Outras não renováveis	0,60
Urânio	1,30
Hidro	11,00
Biomassa da Cana	16,40
Lenha e Carvão Vegetal	8,70
Outras renováveis	8,70
TOTAL	100,00

Fonte: EPE (2022).

2.4. Matriz Elétrica Brasileira e a Energia Solar

O Brasil possui uma matriz elétrica considerada mais limpa que a maioria das nações. Entretanto, isto não significa dizer que a segurança energética brasileira

apresente níveis satisfatórios. Nogueira (2018) esclarece que, devido à matriz elétrica brasileira ser predominantemente hidrelétrica, está sujeita a vários riscos, já que o volume pluviométrico é instável e que depende de fenômenos meteorológicos, além do Brasil ter passado por grandes períodos de estiagem nos últimos 15 anos.

Como no Brasil sempre houve escassez de carvão mineral, diferentemente dos países da Europa, optar por energia hidráulica foi a saída encontrada para atender à demanda energética, já que o território nacional era abundante neste potencial (FERRÃO, 2017). Diante desta situação, a matriz elétrica brasileira é composta expressivamente por energia de origem hidráulica.

No que diz respeito à geração de eletricidade, em 2021 o Brasil teve 53,40% de energia elétrica de origem hidráulica, como pode ser constatado na Figura 1.

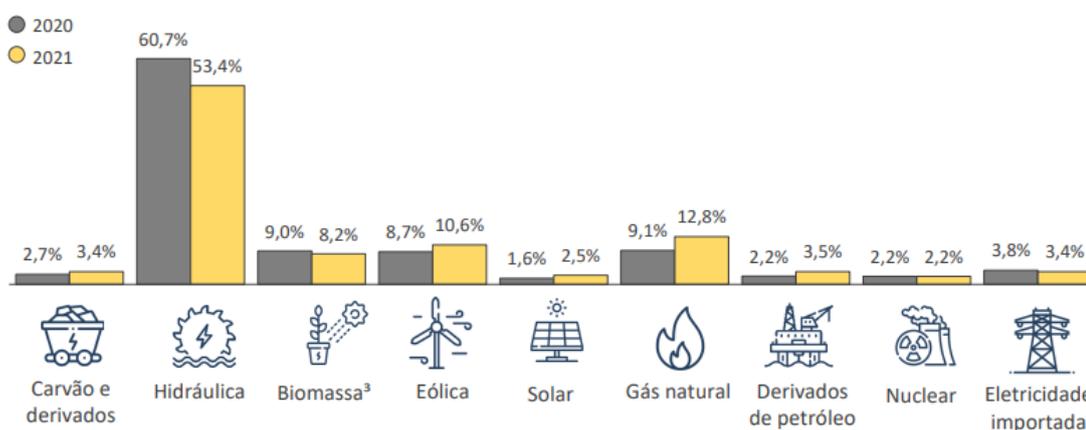


Figura 1 – Matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021. Participação das fontes energéticas em porcentagem.

Fonte: EPE (2022):

Este gráfico também demonstra que a matriz elétrica brasileira possui 78,10% de participação de energias renováveis e apenas 18,5 % de energias não renováveis, apesar do Brasil ter uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo. Pode-se observar que a participação da energia solar é de apenas 2,5%.

Se a recomendação da sociedade científica é adotar energias renováveis para aliviar os impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis, é aconselhável aumentar a participação da energia solar na matriz elétrica, já que a energia de origem hidráulica geralmente está localizada longe dos grandes centros consumidores. Logo, possuem perdas expressivas durante a transmissão e distribuição de energia. Aliado a isto, tem o fato de as centrais elétricas

necessitarem de grandes áreas de inundações, situação que se deve evitar por conta dos impactos ambientais e algumas vezes sociais que os reservatórios de água exigem.

Ao analisar a evolução do setor elétrico brasileiro, demonstrado na Tabela 3, pode-se observar que a energia solar começou a se manifestar, com maior expressão, em 2010 com apenas 1MW de capacidade instalada, sendo que em 11 anos esta capacidade já tinha alcançado 4.632 MW de potência instalada.

Tabela 3 - Evolução da capacidade instalada no setor elétrico brasileiro em (MW)

Anos	Hidro	Térmicas	Nucleares	Eólicas	Solar
1950	1.536	347			
1960	3.642	1.158			
1970	8.828	2.405			
1980	27.649	5.823			
1990	45.558	6.835	657		
2000	61.063	10.481	1.966	19	
2010	80.703	29.689	2.007	927	1
2015	91.237	39.393	1.990	7.630	21
2020	109.271	43.057	1.990	17.131	3.287
2021	109.350	44.866	1.990	20.771	4.632

Fonte: Adaptado de FGV (2016), EPE (2011), EPE (2016), EPE (2021) e EPE (2022)

De qualquer maneira, observa-se de forma isolada os dados que levam a crer que o crescimento da capacidade instalada da energia solar foi alto durante o período de 2010 a 2021, já que representa um crescimento de 4.632 MW. Todavia, em 2021, como pode ser visto na Figura 1, a participação da energia solar na matriz elétrica brasileira foi de apenas 2,5%.

Para Gobbo, Silva e Bone (2018), dois dos aspectos favoráveis ao potencial energético solar do Brasil estão no fato de possuir altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade. Assim sendo, diante da expectativa de expansão de energia de origem fotovoltaica, acredita-se que as influências dessa forma energética poderão impactar a qualidade de energia do sistema elétrico brasileiro, já que, por um lado, são medidas que beneficiam a segurança energética e, por outro são fontes naturais de distúrbios que afetam a qualidade de energia.

2.5. Sistema Fotovoltaico

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em:

- a) Sistema fotovoltaico isolados domésticos;
- b) Sistema fotovoltaico não isolados domésticos;
- c) Sistema distribuídos conectados à rede, que é o objetivo do trabalho proposto;
- d) Sistema centralizado conectado à rede.

No caso dos sistemas conectados à rede, referem-se aos sistemas que utilizam o sol como geração de energia elétrica complementar e seu excedente pode ser injetado na rede da distribuidora (CARVALHO, 2012).

2.5.1. Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos que convertem energia solar em energia elétrica de corrente contínua, compostos por camadas finas, geralmente de silício, que produzem tensões entre 0,5 e 0,8 volts, sendo que sua eficiência depende diretamente da tecnologia de fabricação. A partir de conexão em série e paralela das células, são construídos os módulos solares que, em condições reais, têm operação, bem como estão submetidos à localização geográfica, já que a eficiência pode ser afetada pelas condições atmosféricas e climáticas (PÉREZ, 2019).

Os primeiros efeitos fotovoltaicos são datados em 1839 por meio da descoberta do cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel, quando observou que, ao iluminar uma solução ácida, surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos submersos a essa solução. 37 anos mais tarde, W.G. Adams e R. E. Day produziram o mesmo fenômeno, só que nesta ocasião o dispositivo era sólido composto por selênio. Posteriormente, C. E. Frits desenvolveu, em 1883, o primeiro dispositivo conhecido por célula fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014).

Entretanto, células fotovoltaicas baseadas nos avanços tecnológicos na área de dispositivo semicondutores só viria surgir 110 anos após a primeira observação realizada por Becquerel, ou seja, o laboratório Bell na década de 1950

desenvolveu células fotovoltaicas a partir de lâminas de silício cristalino que atingiram uma eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica relevante, sendo que estas células tinham potência de 5mW em uma área de 2cm² e chegou a 6% de eficiência na conversão (PINHO; GALDINO, 2014).

Conforme Silva *et al.* (2018a), as células fotovoltaicas podem ser classificadas em:

a) Estrutura cristalina do silício: monocristalino e policristalino

Tendo em vista as células de primeira geração, sendo o silício o material principal em sua composição, são as células mais utilizadas na atualidade, com cerca de 85% de imersão no mercado, uma vez que apresentam bom desempenho, estabilidade e eficiência entre 15 e 20%.

b) Películas finas: silício amorfo; telureto de cádmio; cobre, índio e gálio seleneto ou materiais orgânicos

As células de segunda geração, conhecidas por películas ou filmes finos (em torno de 1 µm), são empregadas em 12% das instalações do mundo. Como empregam menor quantidade de semicondutores, tornam as células mais baratas que as do silício e são muito apreciadas em projetos arquitetônicos. Entretanto, possuem como desvantagem a baixa disponibilidade de matéria-prima, baixo rendimento e vida útil mais curta.

O silício amorfo, que possui grande disponibilidade de matéria-prima, é usado em painéis solares semitransparentes, leves e flexíveis, atraindo grande interesse por parte dos arquitetos.

As células compostas por materiais Disseleneto de cobre e índio (CIS) e Disseleneto de cobre, gálio e (CIGS) são bastante similares às do Telureto de cádmio, bem como exibem melhor eficiência se comparadas aos demais materiais da segunda geração. Como possuem boa aparência estética e são flexíveis, é comum que sejam usadas em janelas, revestimentos e formas de telhado. Como vantagem, possuem vida útil alta e, como desvantagem, apresentam pouca abundância, elementos tóxicos na composição e alto custo de produção.

c) Multijunção com concentração fotovoltaica

Por fim, essa categoria refere-se às células fotovoltaicas de terceira geração que em se tratando de eficiência utilizam tanto as vantagens da primeira quanto da segunda geração. Essa categoria emprega tecnologias orgânicas, pontos quânticos, células tandem/multijunção, células de portadores quentes, células solares sensibilizadas por corantes e tecnologias de *up-conversion*⁸. Como vantagem, essa categoria utiliza material não tóxico, abundantes e leves, possível transparência, flexíveis e com baixo peso, além de apresentar baixo custo sobre grandes áreas.

2.5.2. Inversores Fotovoltaicos

A forma de energia mais comum na geração e comercialização de energia é em corrente alternada CA, uma vez que muitas cargas necessitam que a energia seja variável em função do tempo para operar quando as demais cargas operam em corrente contínua CC. Com isso, ao receber a energia na forma alternada possui um dispositivo de retificação que tem o papel de converter a energia para forma contínua.

Como a energia gerada nos módulos fotovoltaicos está na forma contínua, é necessário ter um dispositivo que converta corrente contínua em corrente alternada, e isto ocorreu por meio do inversor fotovoltaico.

Inversores fotovoltaicos que operam conectados à rede⁹, diferentemente dos isolados, devem cumprir normas e recomendações nacionais e internacionais, capazes de sincronizar o sistema com a rede elétrica, garantir o adequado acoplamento, exercer a proteção e o gerenciamento da conexão em razão das condições de ilhamento, irradiação incidente, detecção de perdas de isolamento, além de incorporar as proteções contra sub e sobrefrequência, sub e sobretensão (CASTRO, 2019; PINTO; SILVA FILHO; MACHADO, 2020).

Silva (2016) esclarece que ilhamento acontece quando parte do sistema elétrico de potência (SEP) permanece energizado por meio das fontes de geração

⁸ *Up-conversion*: conversão de direta de fótons (SILVA *et al.*, 2018a).

⁹ A resolução nº 687/2015 estabelece que os inversores conectados a rede devem atender alguns requisitos de segurança e qualidade (PINTO; SILVA FILHO; MACHADO, 2020).

distribuída, mesmo depois do seu desligamento. O ilhamento poderá ocorrer de forma intencional e não intencional, sendo que o último é de origem indesejada. Os inversores devem ser capazes de detectar o ilhamento e interromper sua operação em curto espaço de tempo.

2.6. Geração Distribuída - GD

Com a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro passou a ter direito a gerar energia elétrica, sendo que a partir do dia 1º de março de 2016, essa geração pode ser dada por meio de micro (potência instalada de até 75 kW) e da minigeração (Entre 75 kW a 5 MW) de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada¹⁰ (ANEEL, 2018). Entretanto, para potências acima de 5MW, consideradas usina de geração, não se aplica neste caso (FORTES, 2018).

Carvalho (2012) esclarece que a Geração Distribuída, a partir de fontes renováveis, é uma unidade geradora de energia elétrica localizada muito próxima a carga, isto é, próxima ao consumidor de natureza não despachada oriundo de fontes renováveis, podendo se apresentar como Pequena Central Hidrelétrica (PCH), Central Geradora Hidrelétrica (CGH), biomassa, eólica e solar fotovoltaica.

O Art. 14 do Decreto Lei nº 5.163/2004 estabelece que geração distribuída é a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, com empreendimento hidroelétricas inferior a 30MW e termelétricas, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75% (BRASIL, 2004).

O Ministério de Minas e Energia, em dezembro de 2015, criou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica – ProGD por meio da Portaria nº 538, para incentivar a geração de energia distribuída, especialmente de origem solar fotovoltaica. Em 5 de novembro desse mesmo ano, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 685 que permite a geração de energia para consumo coletivo, tais como condomínio, além da possibilidade do uso da energia

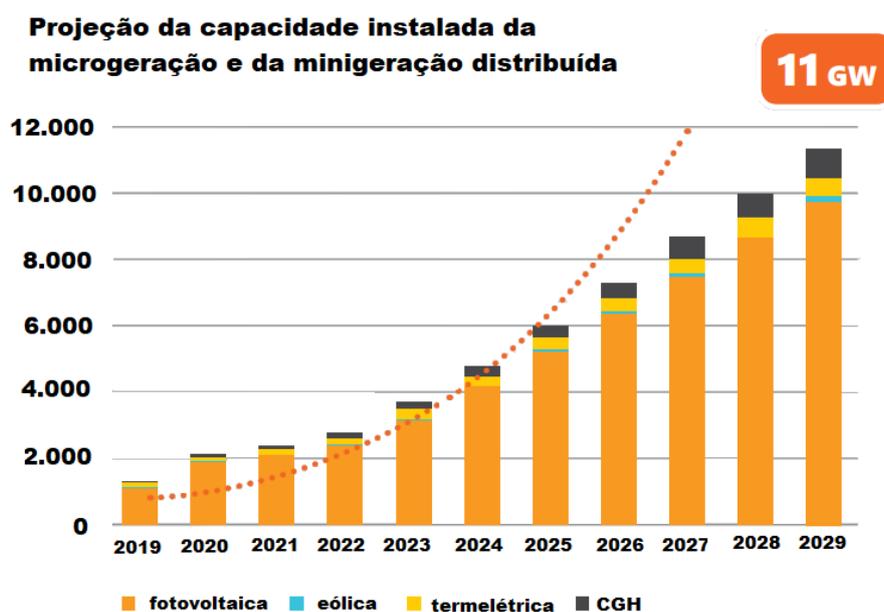
¹⁰ São cogeneradores que atendem os requisitos definidos na Resolução Normativa nº 235 de 14/11/2006, para fins de participação nas políticas de incentivo à cogeração (ANEEL, 2006).

em outra unidade pertencente ao mesmo proprietário, desde que na área de concessão da mesma distribuidora (ABGD, 2021).

Em 6 janeiro de 2022, o Governo Federal aprovou a Lei nº 14.300, que institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Esta lei prevê, de forma gradual, que unidades consumidoras com GD paguem encargos e tarifas pelo uso dos sistemas de transmissão e de distribuição aos micros e minigeradores de energia elétrica. Além disto, também trata da venda de excedentes de energia elétrica exclusivamente por meio de chamadas públicas promovidas pelas distribuidoras de energia e limitação de potência de minigeração distribuída para fontes não despacháveis (FIUZA, 2022).

ABGD (2021) menciona que o Brasil alcançou 1 GW em geração distribuída, em junho de 2019. Em dezembro do mesmo ano, chegou a 2GW e em maio de 2020 alcançou 3GW. Diante das novas legislações para incentivar a geração distribuída, a energia solar está com boas perspectivas de crescimento futuros, tal como pode ser observado na Figura 2, que traz a projeção da capacidade instalada das microgerações e da minigeração distribuída. Pelas expectativas, no período de 10 anos a projeção sugere que o Brasil possa alcançar 11 GW.

Figura 2 - Projeção da capacidade instalada das microgerações e da minigeração distribuída.



Fonte: ABGD (2021).

No Brasil, perante todas as fontes que compõem a geração distribuída, são as unidades consumidoras com GD solar fotovoltaica que possuem predominância dentre as demais fontes, com participação que chega a 99,95% (em UC) ou 98,74% (em Potência Instalada), como pode ser constatado na Tabela 4.

Tabela 4 - Unidades Consumidoras com geração distribuída em outubro de 2022

Tipo	Quantidade Unidade Consumidora UC	Potência Instalada (kW)
Central Geradora Hidrelétrica	29	19.482,57
Central Geradora Eólica	68	939,54
Central Geradora Solar Fotovoltaica	861.126	8.767.978,40
Usina Térmica	301	91.060,62

Fonte: (ANELL, 2022).

Com a adoção da GD, o sistema de distribuição passou a operar não mais em sentido único, ou seja, apenas da rede elétrica para consumidor, mas também em ambos os sentidos, isto é, do consumidor, que também pode ser um cogenerador para a rede. Assim sendo, devido à mudança do fluxo de potência, esse fato pode acarretar alterações na qualidade de energia do sistema (DANTAS; APOLONIO, 2018).

A presença de Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) obviamente afeta o sistema elétrico. Caso tal participação seja acima de 10% entre GDFV em relação à demanda do sistema, podem ser ocasionados impactos significantes. O que chama a atenção nesta situação é que sendo a GDFV considerada uma tecnologia emergente, já que possibilita a conexão em redes de baixa tensão, opera geralmente com baixo fator de coincidência¹¹. Ao comparar esta situação com o fator de coincidência da GDFV, percebe-se que este último está sujeito à irradiação solar e todos os geradores fotovoltaicos irão trabalhar simultaneamente com a máxima potência nos horários de maior insolação. Logo, esse fator pode limitar a penetração

¹¹ Baixo fator de coincidência significa que é pouco provável que as cargas em BT irão entrar em operação todas ao mesmo tempo (FORTES, 2018).

de GDFV oriundo de redes dimensionadas com baixo fator de coincidência devido à sobrecarga imposta aos alimentadores nos horários de pico de geração fotovoltaico (FORTES, 2018).

2.6.1. Fluxo reverso

Fortes (2018) esclarece que no sistema centralizado de energia, o fluxo de potência tem o sentido do nível mais alto de tensão para os mais baixos, de forma unidirecional e tendo o consumidor um comportamento passivo, porém com o advento das GDFV que possibilita um fluxo de potência reverso, o consumidor em alguns momentos do dia se comporta como passivo e, geralmente, durante a noite se comporta ativo. Esse fluxo bidirecional afeta o ajuste de proteção, já que poderá ter sido projetado levando em consideração o sentido único do fluxo.

Fortes (2018) conclui que se o sistema for projetado para um fluxo bidirecional e o GDFV suprir boa parte da carga do alimentador de distribuição, quando houver uma desconexão da GDFV, a corrente necessária para continuar alimentando o sistema será oriunda de geração central aumentando, assim, a queda de tensão no ramal. Se o sistema de regulação de tensão da rede foi ajustado levando em conta GDFV, quando este sair do sistema, poderá provocar a atuação dos equipamentos compensadores até que o sistema identifique a situação e corrija os parâmetros.

2.6.2. Geração Distribuída Fotovoltaica

De acordo com Pereira (2019), a geração distribuída fotovoltaica pode ser classificada em:

- a) Geração Distribuída *off-grid*. São sistemas de geração de energia que não se conectam na rede de distribuição local, composta por bateria, módulos fotovoltaicos, inversor e controlador de carga (PEREIRA, 2019);
- b) Geração Distribuída *on-grid*. São sistemas de geração de energia que se conectam na rede de distribuição local, sendo que o excedente de energia gerado pode ser enviado à rede elétrica e é composto por medidor bidirecional, módulos fotovoltaicos e inversor (que neste caso também tem a função de sincronizar com o sistema da rede pública de energia). Neste

sistema, não há necessidade de armazenamento de energia, pois a geração de energia elétrica será usada pelo consumidor ou injetada na rede elétrica (CARVALHO, 2012; PEREIRA, 2019).

2.7. Tipos de Cargas

O tipo de carga pode influenciar na QEE da tensão que, por sua vez, poderá influenciar no perfil da corrente (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014). Rodrigues e Frigo (2017) explicam que as cargas poderão ser do tipo lineares e não lineares.

- a) Cargas lineares. São aquelas que, quando submetidas a uma tensão puramente senoidal, a carga solicita da rede uma corrente também puramente senoidal com um ângulo de defasagem φ , que pode variar entre -90° a $+90^\circ$ conforme a natureza da carga, podendo ser puramente ou predominantemente capacitiva ou indutiva. Além disto, pode não ocorrer defasagem entre a tensão e a corrente, ou seja, o φ será igual a zero quando a carga for puramente resistiva.
- b) Carga não lineares. São aquelas que, submetidas a uma tensão puramente senoidal e de carga, nesta ocasião, solicita uma corrente não senoidal da fonte, já que essas cargas não obedecem à Lei de Ohm. Exemplos de cargas não lineares são os resistores não lineares, os indutores com núcleo ferromagnético saturado, capacitores com valores variáveis e os dispositivos semicondutores.

Sabe-se que os componentes eletrônicos, geralmente compostos por silício, são um dos maiores causadores de distorções harmônicas, sendo eu o Silício é o semicondutor mais importante para a fabricação de dispositivos eletrônicos presentes na grande maioria das atividades humanas, tais como: transporte, comunicação, computação, controle de processos industriais, medicina, instrumentos de análise e de pesquisa em todas as áreas, ao ponto que é difícil de imaginar uma atividade que não tenha dependência direta, ou mesmo indireta, com algum sistema eletrônico (SANT'ANA, 2020).

2.8. Qualidade De Energia Elétrica - QEE

Para Ribeiro *et al.* (2020), a Qualidade de energia pode ser definida como a frequência e a severidade dos desvios na amplitude e aspecto da onda da tensão e da corrente. Para Pereira (2019), além das situações aqui citadas, é acrescentado o desequilíbrio das tensões e a distorção harmônica. Leão, Sampaio e Antunes (2014) esclarecem que a QEE é a condição do sinal da tensão ou corrente que as máquinas elétricas, os equipamentos elétricos até mesmo o sistema elétrico opera de forma satisfatória e sem prejuízo de ordem técnica, caso contrário, se a alimentação estiver fora dos padrões de QEE, as cargas poderão operar inadequadamente ou até mesmo não operar.

No início, no que diz respeito à qualidade de energia elétrica, a principal preocupação se tratava apenas da continuidade de serviços, sendo que, na década de 1980, os equipamentos não eram tão sensíveis à má qualidade do fornecimento de energia, mas com a evolução das cargas apareceram outros distúrbios no sistema elétrico que afetam a qualidade de energia, tais como: oscilações de tensão, continuidade de fornecimento de energia, nível e desequilíbrio da tensão e distorções harmônicas devem que ser avaliados, principalmente por sua causa e efeito (ARRUDA, 2003).

Com a modernidade, as cargas elétricas com comandos eletrônicos, que são consideradas cargas não lineares, necessitam de picos de energia em determinados momentos. Desta forma, o emprego dos conversores eletrônicos que têm a corrente de entrada disparada em determinado período ou ângulo da oscilação senoidal acaba por distorcer a forma de onda, tanto da tensão quanto da corrente (RIBEIRO *et al.*, 2020)

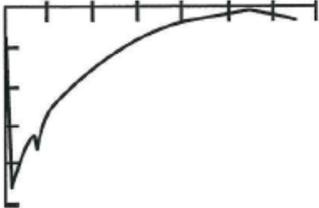
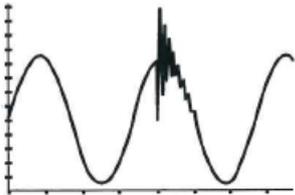
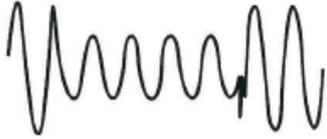
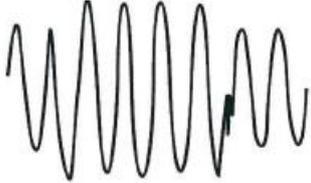
2.8.1. Perturbações Elétricas

Leão, Sampaio e Antunes (2014) enfatizam que as perturbações elétricas podem ser divididas em duas categorias:

- a) Eventos que são perturbações de curta duração e ocasionais;
- b) Sustentados que são perturbações que provocam variações na tensão e na corrente de regime permanente.

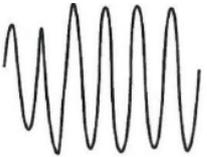
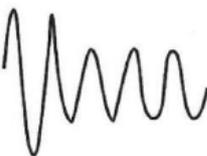
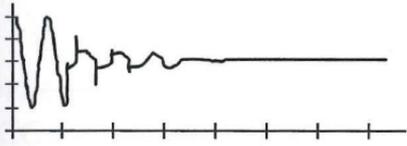
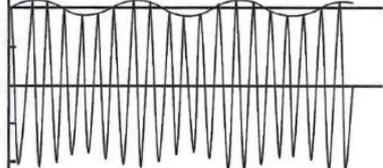
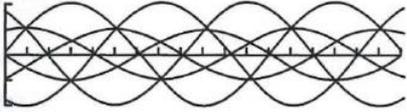
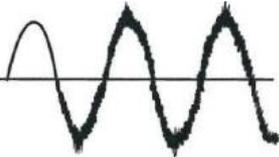
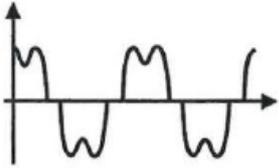
Nas Tabelas 5 e 6, podem ser observados os tipos de distúrbios e forma de onda, categoria de eventos e duração, sendo que é considerado perda de QEE caso ocorra a presença de um ou mais fenômenos listados nas referidas Tabelas.

Tabela 5 - Distúrbios elétricos na categoria de eventos

Tipos de Distúrbio	Duração	Métodos de Caracterização
Transitório Impulsivo 	Curta duração < 50 ns 50 ns – 1 ms > 1 ms	Tempo de subida 5 ns 1 µs 0,1 ms Magnitude de pico Duração
Transitório oscilatório 	Curta duração 0,3 —30 µs 20 µs 5 µs	Tempo de subida Banda de frequência Baixa frequência: < 5 kHz Média frequência: 5 —500 kHz Alta frequência: 0,5 —5 MHz Magnitude de pico 0 —4 pu 0 —8 pu 0 —4 pu
Interrupção 	Curta duração	Magnitude < 0,1 pu Duração 1 ciclo —3 min Frequência de ocorrência
Afundamento de tensão 	Curta duração	Magnitude 0,1 —0,9 pu Duração 1 ciclo —3 min Frequência de ocorrência
Elevação da tensão 	Curta duração	Magnitude 1,1 —1,8 pu Duração 1 ciclo —3 min Frequência de ocorrência

Fonte: Leão, Sampaio e Antunes (2014).

Tabela 6 - Distúrbios elétricos sustentados

Tipos de Distúrbios	Duração	Métodos de caracterização
<p>Sobretensão</p> 	Estado permanente	Magnitude 1,1 —1,2 pu Duração > 1min
<p>Sobtensão</p> 	Estado permanente	Magnitude 0,8 —0,9 pu Duração > 1min
<p>Interrupção</p> 	Estado permanente	Duração > 3min Frequência de ocorrência
<p>Flutuação de tensão</p> 	Estado permanente	Varição da magnitude Frequência de modulação Frequência de ocorrência
<p>Desequilíbrio de tensão</p> 	Estado permanente	Fator de desequilíbrio
<p>Ruídos</p> 	Estado permanente ou Curta duração	Magnitude Espectro de frequência
<p>Notches ou Cortes</p> 	Estado permanente	Magnitude Duração
<p>Harmônicos</p> 	Estado permanente	Espectro harmônico Distorção harmônica

Fonte: Leão, Sampaio e Antunes (2014).

2.9. Harmônica¹² e Distorção Harmônica

Quando aparece no sistema de energia elétrica um fenômeno capaz de distorcer a forma de onda da corrente ou da tensão, desviando-as da forma senoidal a ponto de causar danos aos equipamentos, esse fenômeno chama-se harmônica e foi observado pela primeira vez em 1916 quando Steinmetz examinou a presença da terceira harmônica causada pela saturação do núcleo de ferro do transformador e de máquinas elétricas de um sistema trifásico (JAMAL *et al.*, 2019).

No caso do distúrbio de qualidade de energia conhecido como harmônicos, Martinho (2013) esclarece que esse distúrbio é de natureza constante e não temporária, logo merece destaque dentro dos assuntos de QEE.

É sempre desejável que o sistema elétrico seja composto por ondas puramente senoidais, uma vez que os aparelhos elétricos são projetados para operar nestas condições.

Uma onda distorcida é o resultado da sobreposição de uma série de ondas senoidais que possuem uma onda fundamental e um conjunto de onda chamado harmônicas. A fundamental f_1 que, no caso, é a componente mais relevante deste conjunto e possui a menor frequência de ordem inteira, geralmente determina a frequência de oscilação da onda distorcida, sendo que cada múltiplo inteiro da fundamental define a ordem do harmônico. Quando esses múltiplos não são inteiros, são denominados inter-harmônicos e, quando esses múltiplos possuem valores abaixo da frequência fundamental, são chamados de sub-harmônicos, conforme pode ser observado na Tabela 7 (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Em um sistema alimentado por sinal senoidal, devido às características da maioria das cargas, os semiciclos positivos e negativos são idênticos e simétricos em relação ao eixo horizontal, porém na presença de harmônicas pares, apesar de se manifestar em menor intensidade, esse fato faz com que ocorra uma assimetria de meia onda no sinal. A presença de harmônicas pares normalmente acontece

¹² Harmônica ou harmônico é usado indistintamente na engenharia, sendo harmônica o uso mais comum. É o conjunto de oscilações cuja frequência é um múltiplo inteiro da oscilação principal (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014; MICHAELIS, 2021).

quando há falha de sincronismo do chaveamento dos conversores de potência durante a energização de transformadores (FORTES, 2018).

Tabela 7 - Componentes espectrais de forma de onda de frequência f

Harmônica	$f = h \cdot f_1$, em que h é um número inteiro maior que zero
Componente cc	$f = h \cdot f_1$, em que $h = 0$
Inter-harmônica	$f = h \cdot f_1$, em que h é um número não inteiro maior que zero
Sub-harmônica	$f = h \cdot f_1$, em que $h < 1$

Fonte: (LEÃO, SAMPAIO e ANTUNES, 2014).

No Brasil, o sistema elétrico opera em 60 Hz, enquanto as harmônicas de segunda ordem estão sob a frequência de 120 Hz. As harmônicas de terceira ordem possuem a frequência de 180 Hz e sucessivamente, ou seja, a h -ésima harmônica se manifesta na frequência de $(h \times 60)$ Hz (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

A Figura 3 apresenta uma forma de onda não perfeitamente senoidal e suas componentes harmônicas que, somadas entre si, representam a forma de onda resultante não senoidal.

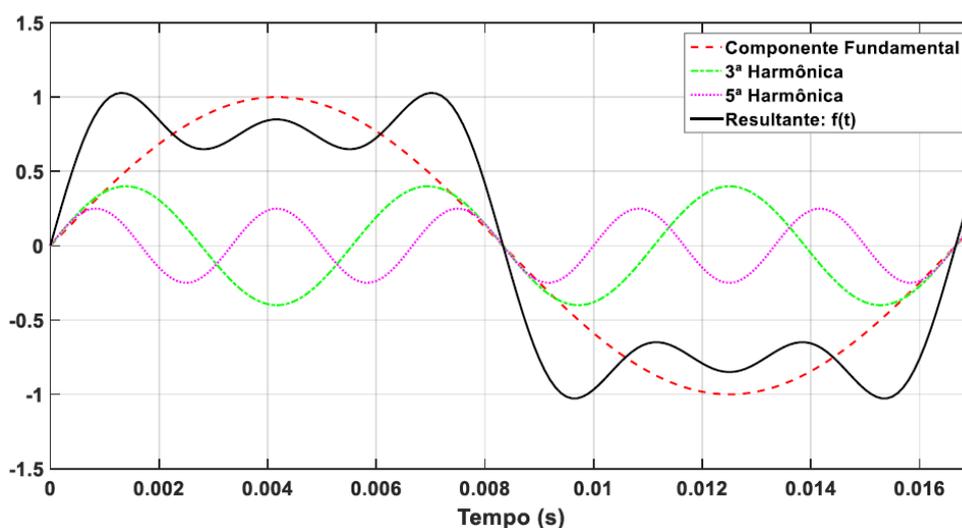
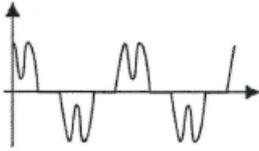
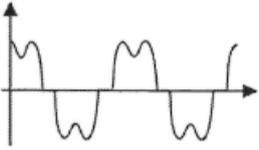
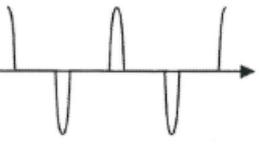
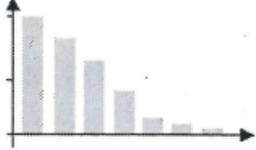
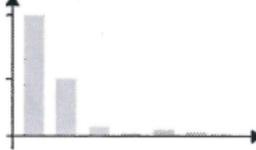


Figura 3 - Forma de onda periódica e suas componentes harmônicas.

Fonte: CASTRO (2019).

Com o advento dos equipamentos eletrônicos, é perceptível o aumento dos problemas relacionado com a qualidade de energia, pois algumas cargas têm por natureza distorcer a forma de onda senoidal, como pode ser constatado na Tabela 8.

Tabela 8 - Exemplos de forma de onda de correntes distorcidas em cargas eletrônicas

Carga não lineares	Forma de Onda	Espectro de Frequência ¹³
Acionamento de velocidades variáveis		
Carregador de bateria		
Processamento de dados		
Lâmpada fluorescente		

Fonte: Leão, Sampaio e Antunes (2014).

2.10. Normas e Recomendações

Com objetivo de otimizar a qualidade técnica das atividades de engenharia, as normas e recomendações técnicas oferecem padrões, regras e critérios capazes de ofertar qualidade e segurança aplicado ao serviço.

¹³ “O espectro de frequência é a representação gráfica da amplitude de cada uma das componentes harmônicas presentes em uma determinada forma de onda, relacionadas a partir do valor percentual à fundamental” (FORTES, 2018, p. 69).

A falta de unificação ou adoção de mesmo critério, das normas de QEE, prejudica os consumidores. Em muitos casos, um equipamento previsto para operação em um determinado país pode apresentar mal funcionamento em outro país quando submetido a uma rede diferente em termos de características técnicas, padrões e comportamento. As diferenças entre IEC e IEEE, quando se analisa os impactos das cargas, é que IEEE (EUA) se preocupa com os impactos que a unidade consumidora provoca na rede sem levar em conta a carga, que é visto como um problema do consumidor, porém, causadora das distorções dos sinais, por sua vez a IEC (EUROPA) faz a regulamentação de cada equipamento (carga) preocupando-se com impacto que pode provocar na rede (DECKMAN; POMILIO, 2020).

2.10.1. Normas e Recomendações Nacionais¹⁴

A norma NBR 16.149/2013 preconiza que a distorção harmônica da corrente deve ser inferior a 5% da corrente fundamental na potência nominal do inversor, sendo que cada harmônica individual deve ser limitada conforme os valores estabelecidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Limite de distorções harmônicas de corrente

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

Fonte: NBR (2013).

¹⁴ No Brasil, algumas normas estrangeiras são adaptadas integralmente ou pelo menos parcialmente.

O Ponto em que deve ser medido as harmônicas, situa-se, segundo a norma NBR 16.149/2013, na interface da rede com o ponto comum entre a geração FV e a carga denominada PAC¹⁵, conforme pode ser observado na Figura 4.

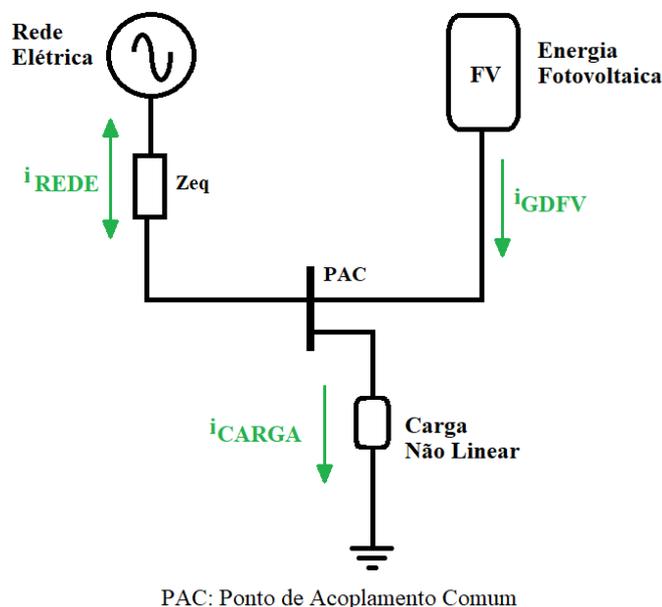


Figura 4 - Sentido das correntes e Ponto de medição PAC.

Fonte: Autora

No Brasil, existe a recomendação PRODIST, sem força de norma, mas com influência técnica, que diz respeito aos documentos desenvolvidos pela ANEEL, com caráter de normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Entre seus 11 módulos, destaca-se o módulo 8¹⁶ que diz respeito a à qualidade da energia elétrica. Neste módulo, é possível estabelecer a qualidade da energia referente à tensão, distorções harmônicas da tensão, frequência, fator de potência, entre outros (ANEEL, 2021).

No que tange à qualidade de energia, de acordo com Martinho (2013), os setores abrangidos pelo módulo 8 do PRODIST são:

¹⁵ Segundo a NBR 16.149/2013, todos os parâmetros de qualidade de energia (tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência) devem ser medidos na interface de rede/ponto de conexão comum (BRASIL, 2013).

¹⁶ A última alteração do módulo 8 trata-se do anexo VIII da Resolução Normativa Nº 956, de 7 de dezembro 2021.

- a) Distribuidoras de energia;
- b) Transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão (DIT);
- c) Produtores de Energia;
- d) Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS;
- e) Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- f) Unidades consumidoras com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição.

Sob a ótica da qualidade do produto, que se refere à qualidade de energia ofertada ao consumidor, os limites das distorções harmônicas totais em percentagem de tensões fundamentais são indicados na Tabela 10, conforme preconiza PRODIST - Módulo 8 da ANEEL (2021).

Tabela 10 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	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: ANEEL (2021)

Onde:

DTT95%: Valor do indicador DTT%¹⁷ (distorção harmônica total de tensão) que foi superado em apenas 5 % das 1.008¹⁸ leituras válidas;

DTT_p95%: Valor do indicador DTT_P% (distorção harmônica total de tensão para os componentes pares não múltiplas de 3) que foi superado em apenas 5 % das 1.008 leituras válidas;

¹⁷ DTT É conhecido também como DHT.

¹⁸ No intuito de se obter 1.008 leituras válidas, intervalos adicionais devem ser agregados, sempre consecutivos (item 82 do Módulo 8 – PRODIST).

DTT_i95%: Valor do indicador DTT_i% (distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3) que foi superado em apenas 5 % das 1.008 leituras válidas;

DTT₃95%: Valor do indicador DTT₃% (distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3) que foi superado em apenas 5 % das 1.008 leituras válidas.

Os índices de conformidade para a tensão discriminam em um único limite para todas as ordens de harmônicas. Além disto, aplica-se um percentil de 95 aos dados coletados a fim de extrair todos as informações que sofrerão distorções anormais por chaveamento, transitório ou outra situação que descaracterize a natureza da onda analisada (SANTILIO, 2022).

De acordo com a ANEEL (2021), no item 26.2 do módulo 8 do PRODIST, o conjunto de leituras que estabelece os indicadores da qualidade da energia elétrica deve compreender o registro de 1.008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de agregação) de 10 minutos cada.

Para as medições de distorções harmônicas, na ocorrência de variações de tensão de curta duração ou de interrupções de longa duração, o intervalo de medição de 10 (dez) minutos deve ser expurgado e substituído por igual número de leituras válidas, e os intervalos adicionais devem ser agregados, sempre consecutivamente, conforme o módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021).

2.10.2. Normas Internacionais

No âmbito internacional, Melo Filho e Azevedo (2018) e Kemmerich *et al.* (2020) contribuíram informando algumas regulamentações que envolvem qualidade de energia, operação e segurança dos sistemas conectados à rede, tais como:

- a) IEEE 929/2000 - *Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*: preconiza a prática recomendada para a interface entre a concessionária e os sistemas fotovoltaicos;
- b) IEEE 1547:2018 - *Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*: diz respeito às fontes distribuídas conectadas aos sistemas elétricos de potência;

- c) IEEE 519:2014 - *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*: avalia os limites de distorção harmônica de tensão e de corrente.
- d) IEC 61727:2004 – *Characteristics of the Utility Interface*: estabelece a distorção harmônica total de no máximo 5%.
- e) IEC 61000-3-4:2020 - *Electromagnetic compatibility (EMC) Testing and measurement techniques. Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*. Essa norma foi responsável por basear a NBR IEC 61000-4-30: “Compatibilidade Eletromagnética: Parte 4-30 - Técnicas de Medição - Métodos de Medição da Qualidade da Energia Elétrica.
- f) IEC TS 62786:2017 - *Distributed energy resources connection with the grid*. Essa norma trata de EMC e qualidade de energia, entre outros requisitos técnicos aplicados à geração distribuída.
- g) EN 50438:2013 - *Requirements for micro-generating plants to be connected in parallel with public low-voltage distribution networks*. Esta Norma Europeia especifica os requisitos técnicos para as funções de proteção e as capacidades operacionais de usinas de microgeração, projetadas para operação em paralelo com redes públicas de distribuição de baixa tensão.
- h) EN 50549-1:2019 - *Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks - Part 1: Connection to a LV distribution network - Generating plants up to and including Type B*: Requisitos para microusinas de geração a serem conectadas em paralelo com redes públicas de distribuição de baixa tensão.

Kemmerich *et al.* (2020) explicaram que a norma americana IEEE 1547:2013 e a norma europeia IEC 61727:2004 adotam o valor limite para a distorção harmônica total, de 5% da saída nominal do inversor.

Sobre os limites das taxas de distorção harmônicas individual e total, Kemmerich *et al.* (2020) fazem um comparativo entre as normas americanas e europeias que pode ser observado na Tabela 11. As informações nesta Tabela são as harmônicas entre a 2ª ordem até as harmônicas superior a 35ª ordem.

Tabela 11 - Comparação dos limites da taxa de distorção harmônica individual e total

Harmônica	IEEE 1547:2013	IEC	IEC TS 62786:2017		EN 50438:2013	
	IEEE 1547:2018	61727:2004	I < 16 ^a	I > 16 ^a	EN 50549-1:2015	EN 50549-1:2019
					I < 16A	I > 16A
2°	1,000%	1,00%	0,20%	0,40%	0,20%	0,40%
3°	4,000%	4,00%	0,90%	1,25%	0,90%	1,25%
4°	1,000%	1,00%	0,20%	0,40%	0,20%	0,40%
5°	4,000%	4,00%	0,40%	1,50%	0,40%	1,50%
6°	1,000%	1,00%	0,20%	0,40%	0,20%	0,40%
7°	4,000%	4,00%	0,30%	1,25%	0,30%	1,25%
8°	1,000%	1,00%	0,20%	0,40%	0,20%	0,40%
9°	4,000%	4,00%	0,20%	0,60%	0,20%	0,60%
10°	0,500%	0,50%	0,20%	0,40%	0,20%	0,40%
11°	2,000%	2,00%	0,10%	0,70%	0,10%	0,70%
12°	0,500%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
13°	2,000%	2,00%	0,10%	0,60%	0,10%	0,60%
14°	0,500%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
15°	2,000%	2,00%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
16°	0,375%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
17°	1,500%	1,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
18°	0,375%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
19°	1,500%	1,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
20°	0,375%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
21°	1,500%	1,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
22°	0,150%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
23°	0,600%	0,60%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
24°	0,150%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
25°	0,600%	0,60%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
26°	0,150%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
27°	0,600%	0,60%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
28°	0,150%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
29°	0,600%	0,60%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
30°	0,150%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
31°	0,600%	0,60%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
32°	0,150%	0,50%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
33°	0,600%	0,60%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
34°	0,075%	-	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
35°	0,300%	-	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
>35°	-	-	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%
TDH	5,000%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%

Fonte: Kemmerich *et al.* (2020).

Deckmann e Pomolio (2020) esclarecem que a IEC 61000 estabelece nível de compatibilidade para os sistemas públicos de BT em corrente alternada com

valores nominais monofásicos de até 420V e trifásicos de até 690 V em 50Hz ou 60 Hz aplicados nos pontos de acoplamentos comum. Os fenômenos levados em conta são:

- flutuações de tensão e cintilação luminosa;
- harmônicos até e incluindo a ordem 40;
- inter-harmônicos até o 40º harmônico;
- distorção de tensão de modo diferencial em frequências mais altas (acima do 40º harmônico até 150 kHz);
- afundamentos de tensão e interrupções de curto fornecimento;
- desequilíbrio de tensão;
- sobretenções transitórias;
- variação de frequência;
- componentes CC.;
- sinais de sistemas de comunicação de rede (MCS).

2.11. Distorção Harmônica Total – THD ou *Total harmonic distortion* - TDH

Distorção de harmônicas total é índice mais comum de indicador de harmônicas capaz de estabelecer o desvio total da onda senoidal deformada em relação a sua componente fundamental, ou seja, é medido o grau de distorção de um sinal senoidal em relação a uma senoide pura (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Castro (2019) equaciona tanto a distorção harmônica de tensão quanto a distorção harmônica de corrente, sendo que a distorção da tensão THD_V é definida como:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad [EQ 01]$$

Onde:

V_h : é o valor eficaz da tensão de ordem h (pico ou *rms*);

V_1 : é o valor eficaz da tensão fundamental do sinal (pico ou *rms*);

h_{max} : é a máxima ordem da componente (que se inicia na ordem 2).

h_1 : é a componente fundamental do sinal da tensão.

Da mesma forma que a distorção da corrente THD_I é definida como:

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad [\text{EQ 02}]$$

Onde:

I_h : é o valor eficaz da corrente de ordem h (pico ou *rms*);

I_1 : é o valor eficaz da corrente fundamental do sinal (pico ou *rms*);

h_{max} : é a máxima ordem da componente (que se inicia na ordem 2).

h_1 : é a componente fundamental do sinal da tensão.

2.12. Distorção Harmônica Individual

A fim de entender a distorção harmônica individual tanto da tensão quanto da corrente, é utilizado o fator harmônico definido por Leão, Sampaio e Antunes (2014).

$$DHI = \frac{C_h}{C_1} \cdot 100\% \quad [\text{EQ 03}]$$

Onde:

C_1 : é a componente fundamental da onda em A ou V;

C_h : é a componente harmônica da tensão ou da corrente de ordem h em relação à fundamental C_1 em A ou V.

2.13. Medição de Harmônicas

O módulo 5 (Sistema de Medição) do PRODIST estabelece que a medição, por parte da distribuidora tem que ser obrigatoriamente por equipamento da classe S ou A, sendo esta última obrigatória apenas para a solução de disputas específicas ANEEL (2021). Por sua vez, a classe S é usado para diagnóstico ou avaliação da qualidade de energia (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Além disto, o Módulo 8 (Qualidade da Energia Elétrica) do PRODIST preconiza que o espectro de frequência para fins de cálculo de distorção total deve conter a componente fundamental até, pelo menos, a 40ª ordem harmônica (ANEEL, 2021), sendo que na classe S a escolha de medir até 40ª ordem está em conformidade com a IEC 61000-4-7 classe II (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

2.14. Fontes de Harmônicas

Da mesma forma que a defasagem do ângulo entre a corrente e a tensão é indesejável, porém intrínseca a algumas cargas, o mesmo acontece com as harmônicas que surgem devido à natureza do sistema, equipamentos e máquinas. A seguir serão exemplificadas algumas cargas que são fontes naturais de harmônicas:

- a) Fornos de arco elétrico. Operam por meio de uma fonte de energia conectada a eletrodos que, por meio de um curto-circuito, promovem arco elétrico de alta magnitude suficiente para fundir uma carga metálica, necessitando apenas de baixas tensões e altas correntes (CÂNDIDO, 2008).
- b) Lâmpadas Fluorescentes. As lâmpadas fluorescentes são cargas não lineares. Logo, quando submetidas a uma tensão senoidal produzem correntes com distorção harmônica (MARTÍNEZ; LEMBA, 2018).
- c) Transformadores. A causa das harmônicas em transformadores é devido à relação não linear entre o fluxo magnético e a corrente de excitação. Como os transformadores estão submetidos aos campos eletromagnéticos, logo também sofrem de interferência eletromagnética quando as correntes e tensões têm suas formas de ondas distorcidas, devido ao aparecimento de componentes harmônicos. Isto resulta em impactos como aquecimento,

perdas no núcleo, diminuição da vida útil e aparecimentos de ruídos elétricos (FERREIRA; AMARAL, 2012).

- d) Conversores eletrônicos. Em estabelecimentos comerciais e residenciais, é comum a presença de cargas monofásicas que possuem fontes chaveadas. Uma das características dessas fontes é que possuem alto conteúdo de harmônicas de 3ª ordem e superiores presentes na corrente, do qual podem sobrecarregar o condutor neutro, principalmente em instalações elétricas antigas (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).
- e) Inversores. O inversor ideal deveria apresentar formas de onda de corrente e de tensão puramente senoidal, sem variação na frequência e com fator de potência unitário, mas os inversores de fato apresentam uma composição da forma de onda na frequência fundamental com as suas harmônicas (RAMPINELII; DIAS; KRENZINGER, 2008), sendo que os inversores de frequência produzem harmônicas de quinta, sétima, décima e décima terceira ordem (CAPELLI, 2013).

Com a forte evolução da eletrônica, muitos equipamentos, tais como: televisão, microcomputadores, carregadores de celular são normalmente alimentados por correntes alternadas CA, porém utilizam internamente tensões contínuas CC. A conversão de uma forma de energia em outra pode ser feita por meio de conversores lineares ou estáticos (também conhecidos como fontes chaveadas). As fontes chaveadas devido aos processos de retificação da forma de onda de tensão da rede e do chaveamento da forma de onda de tensão CC são geradoras de uma grande quantidade de componentes harmônicos (CEZÁRIO, 2012).

2.15. Efeitos das Harmônicas

Leão, Sampaio e Antunes (2014) relatam que os efeitos das harmônicas podem ser imediatos ou de longa duração. São considerados imediatos, os disparos de relés, queima de fusível, flutuação de imagens, mal funcionamento de imagens, entre outros e, tendo em vista os efeitos de longa duração, os aquecimentos de capacitores, cabos, motores, transformadores e máquinas rotativas, além de provocação de ruídos, vibrações entre outros.

2.15.1. Corrente no Neutro

Um sintoma característico da presença de harmônicas nas instalações elétricas é o excesso de corrente de neutro, principalmente quando a terceira harmônica é expressiva (CAPELLI, 2013). Em um sistema trifásico com 4 fios equilibrado sem a presença de harmônicas e não submetido ao efeito de aproximação¹⁹, a corrente do condutor neutro é zero, porém quando esse sistema está alimentando muitas cargas monofásicas não lineares, principalmente oriundas de iluminação e computadores, que são cargas típicas de ambientes universitários, surge uma corrente no condutor neutro superior a corrente do neutro caso o circuito em questão fosse desequilibrado, e poderá chegar a uma corrente três vezes superior a maior corrente percorrida pelos condutores. (CASTRO, 2019; LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

2.16. Série de Fourier

Uma forma de onda periódica, seja senoidal ou não senoidal, pode ser representada pela soma de senos e cossenos que, deste modo, em muitos casos, simplifica a função, e este sinal pode ser decomposto por meio das séries de Fourier para identificar a presença de componentes harmônicos, sendo que as harmônicas são fenômenos permanentes e não duram apenas alguns ciclos caracterizando distúrbios e problemas de QEE (CASTRO, 2019) e (FORTES, 2018).

Essa ferramenta matemática aplicada a uma forma de onda não senoidal determina a frequência, a amplitude e a fase de cada senoide a fim estabelecer uma relação direta entre uma função contínua no domínio do tempo e a função discreta no domínio da frequência (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Uma função periódica qualquer pode ser dada a partir da expressão matemática eq. 04:

¹⁹ Efeito de aproximação surge devido ao efeito de outros campos magnéticos produzidos por cabos próximos ao condutor analisado (CASTRO, 2019).

$$f(t) = f(t + hT), \text{ quando } h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [\text{EQ 04}]$$

Onde:

T: é o período da função periódica definida pela menor constante positiva;

h : é o conjunto de números inteiros;

t : é o tempo

A função $f(t)$ pode ser definida por uma série trigonométrica, tal como pode ser observado na exp. 05 (ALEXANDER; SADIKU, 2013)

$$f(t) = \underbrace{A_0}_{cc} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega t) + B_h \text{sen}(h\omega t)]}_{ac} \quad [\text{EQ 05}]$$

Onde:

ω : é a frequências fundamental de $f(t)$ definida como $\omega = 2\pi/T$ medido em rad/s;

A senoide $\text{sen}(h\omega t)$ ou $\cos(h\omega t)$: é chamada de n – ésima harmônica de $f(t)$;

h : é a ordem do harmônico.

A_0 : é o valor médio de $f(t)$, ou seja, é a componente cc do sinal;

A_h e B_h : é a amplitude ou valor de pico da comp fundamental de ordem h da série; também conhecidos como componentes de Fourier.

É importante ressaltar que o coeficiente A_0 representa o valor médio de $f(t)$ e em uma senoide esse valor é nulo (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Por intermédio da Análise de Fourier, uma forma de onda periódica de frequência f pode ser decomposta em uma soma infinita de componentes senoidais, também chamado de harmônicos, sendo que a frequência f é denominada de frequência fundamental e os múltiplos de f de harmônicos (KAGAN, 2009).

2.16.1. Simetria do sinal

a) Simetria Ímpar

Em uma forma de onda, quando os semiciclos positivos e os semiciclos negativos são idênticos, obviamente possuindo a mesma área, e simétricos à origem (0,0), essa série de Fourier contém somente harmônicos de ordem ímpares, além disto não possui a componente cc (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014). Em outras palavras, são sinais com forma de onda espelhada em 180° e suas componentes pares são eliminadas.

Uma função ímpar é representada apenas por seus senos, isso faz sentido uma vez que a função seno por si só é ímpar (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Exemplo de sinal com simetria ímpar está representado na Figura 5.

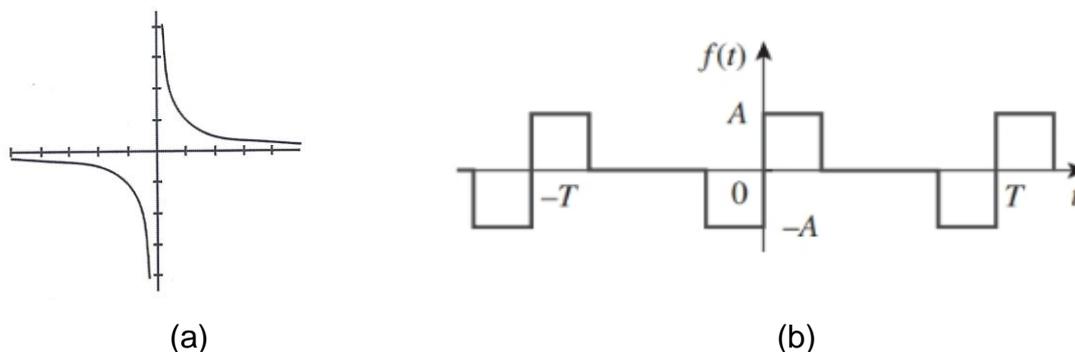


Figura 5 (a) e 5 (b) – Função com simetria ímpar.

Fonte: (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014; ALEXANDER; SADIKU, 2013)

b) Simetria Par

No caso da função par, seus senos são nulos e esse sinal é representado apenas por seus cossenos. Aqui é importante ressaltar que a função cosseno por si só é uma função par e evidentemente esse sinal só terá harmônicas de ordem par (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Exemplo de sinal com simetria ímpar está representado na Figura 6.

Em muitos casos, as harmônicas pares são relativamente menores, uma vez que as harmônicas de ordem ímpar são dominantes. A presença de harmônicas pares caracteriza simetria do sinal em relação ao eixo do tempo (eixo vertical),

porém isto não implica componentes cc neste sinal (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

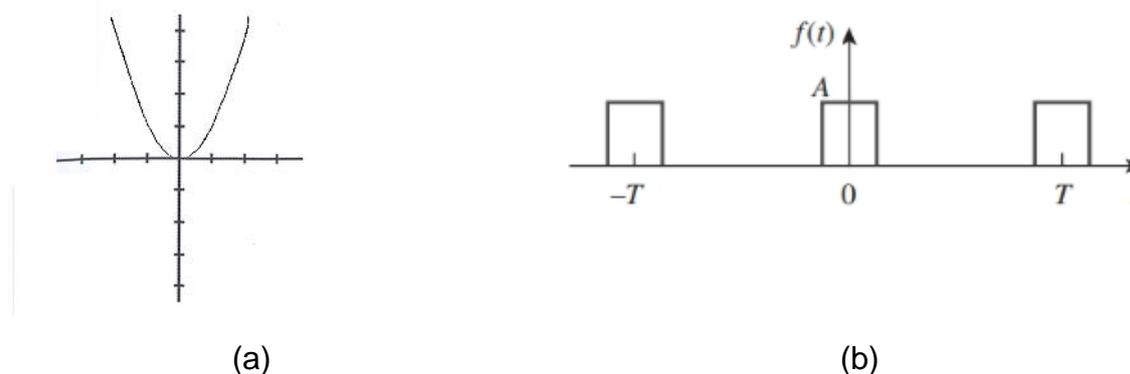


Figura 6 (a) e 6 (b) – Função com simetria par.

Fonte: (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014; ALEXANDER; SADIKU, 2013)

2.16.2. Componente CC

Qualquer onda não senoidal periódica pode ser decomposta em duas partes, sendo a primeira parte formada pela soma de uma componente contínua (valor médio de onda) e a segunda parte composta por uma série de infinitos termos senoidais. Sabe-se que a componente contínua (componente cc) produz assimetria de meia onda, que causa diferença entre o valor das áreas do semiciclos positivo e do negativo e este fato ocorre na geração de harmônicas pares que está normalmente associada à presença de componente contínua (FORTES, 2016).

Se uma onda não for nem par e nem ímpar, isto significa que neste sinal estarão presentes todos os termos, porém, se o sinal ímpar ou par for simétrico em relação ao eixo horizontal, isto equivale afirmar que a componente cc, representada na equação 5 é nula, portanto, o valor médio da onda é zero (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

2.17. Transformada de Fourier

A transformada de Fourier mostra todas as frequências que possuem um sinal, visto que não precisa ser necessariamente periódico. Em outras palavras, essa transformada converte o sinal de qualquer função no domínio do tempo para o

domínio da frequência, apresentando como resultados todos as frequências que compõem este sinal.

Leão, Raimundo e Antunes (2014) concluíram que a Transformada de Fourier²⁰ mapeia sinais aperiódicos no domínio do tempo e transforma para um sinal no domínio da frequência, tendo como resultado um espectro contínuo.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad [\text{EQ 06}]$$

Onde:

$F(\omega)$: é a função densidade espectral de $f(t)$.

A transformada inversa de Fourier calcula a função contínua, de período infinito, $f(t)$, no domínio do tempo.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{j\omega t} dt \quad [\text{EQ 07}]$$

2.18. Variação da Frequência

A variação de frequência geralmente acontece durante a geração de energia e pode atingir alguns equipamentos como, por exemplo, monitores CRT²¹ ao ponto de causar danos psicológicos devido à cintilação. Sendo assim, o módulo 8 do PRODIST estabelece que a variação de frequência não deve ultrapassar 0,5 Hz em relação à frequência fundamental que, no Brasil, se refere a 60 Hz. Entretanto, atualmente o desafio está em fiscalizar as gerações próprias de energia, uma vez que a regulamentação não pode fazê-la (MARTINHO, 2013).

²⁰ As séries de Fourier são utilizadas em sinais periódicos e são um caso particular da transformada de Fourier aplicado em um sinal periódico (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES).

²¹ CRT (*Cathodic Ray Tube*) são monitores de raios catódicos que utilizam tubo de imagem (MORIMOTO, 2004).

O módulo 8 do PRODIST, em seu item 65, define que os sistemas de distribuição e as instalações de geração a ele conectados devam operar dentro da faixa de frequência que vai de 59,9 Hz a 60,1 Hz.

2.19. Tensão

A Variação de tensão é um processo natural, uma vez que os consumidores ao longo do dia solicitam demandas variáveis. Logo, a tensão no barramento sofrerá oscilações (KAGAN, 2009).

O PRODIST no módulo 8 informa que, em regime permanente, um dos fenômenos que afeta a onda de tensão é a presença de harmônicos. Para sistemas inferiores a 2,3 Kv, a tensão deve situar-se entre 95% a 105% da tensão nominal de operação no ponto de conexão. A ANEEL estabelece que a tensão nominal representa a tensão de referência TR. Além disto, informa faixas de tensão tidas como críticas e precárias, como pode ser observado nas Tabelas 12, 13 e 14, todas referentes ao consumidor atendido em tensão nominal inferior a 2,3 kV, sendo que:

a) Tabela 12. Tensão de fase 127 V e tensão de linha 220 V. Regiões brasileiras atendidas em baixa tensão por essas tensões: Acre, Amapá, Amazonas, algumas regiões da Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, algumas regiões do Rio Grande do Sul, Rondônia, Roraima, São Paulo, algumas regiões de Sergipe e Dianópolis – TO (UFRGS, 2019).

Tabela 12 - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (220/127)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: PRODIST módulo 8.

b) Tabela 13. Tensão de fase 220 V e tensão de linha 380 V. Regiões brasileiras atendidas em baixa tensão por essas tensões: Alagoas, Bahia, Ceará, Distrito Federal, Goiás, Maranhão, algumas regiões do Mato Grosso, Paraíba, Rio negro-PR, Pernambuco, Piauí, Nova Friburgo-RJ, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, algumas regiões de São Paulo e Tocantins (UFRGS, 2019).

Tabela 13 - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (380/220)

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

Fonte: PRODIST módulo 8.

c) Tabela 14: Tensões 254/127V. Regiões rurais do Brasil.

Tabela 14 - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (254/127)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(234 \leq TL \leq 267) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(221 \leq TL < 234 \text{ ou } 267 < TL \leq 269) /$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 221 \text{ ou } TL > 269) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: PRODIST módulo 8.

2.20. Inversores e Módulos Fotovoltaicos no mercado brasileiro

Dentro do mercado brasileiro, existem muitos fabricantes de módulos fotovoltaicos e inversores, sendo que os mais comuns estão indicados nas Figuras 7 a 10.

A Figura 7 mostra os módulos fotovoltaicos mais importados no ano de 2020 expressos em MWp, sendo que entre 77 marcas as 101 primeiras colocadas responderam por 87% do total importado (GREENER, 2021).

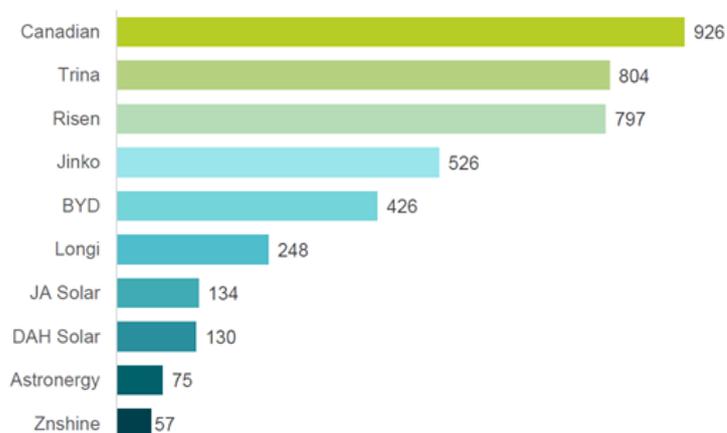


Figura 7 – Módulos fotovoltaicos importados no segundo semestre de 2020 por volume em MWp.

Fonte: Greener (2021)

A Figura 8 salienta os inversores de potência de até 9,9 kW mais procurados no mercado brasileiro, sendo que das 68 marcas encontrada no Brasil os 10 primeiros colocados correspondem a 80% do total importado (GREENER, 2021).

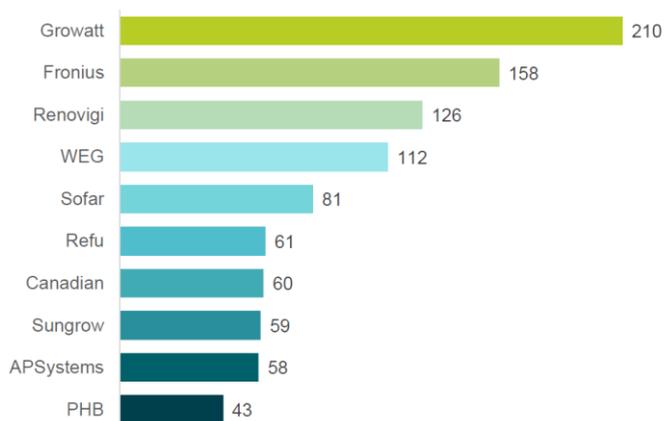


Figura 8 – Inversores de potência de até 9,9 kW importados no segundo semestre de 2020 por volume em MW.

Fonte: Greener (2021)

A Figura 9 mostra os inversores de potência entre 10,0 kW e 49,9 kW mais procurados no mercado nacional, sendo que no total de 44 fabricantes encontrados

no país, os 10 primeiros colocados correspondem a 79% do total importado (GREENER, 2021).

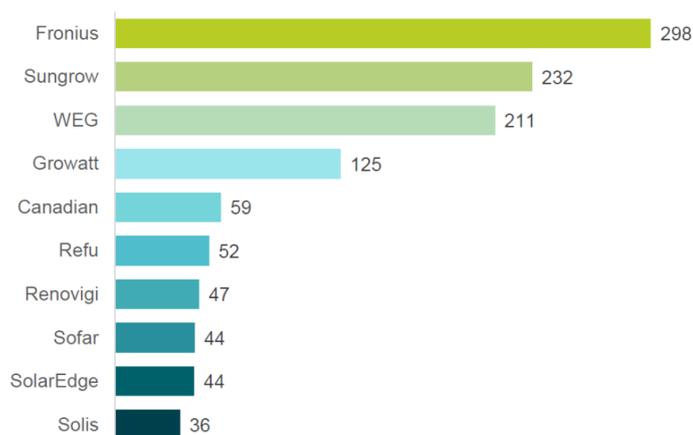


Figura 9 – inversores de potência entre 10,0 kW e 49,9 kW importados no segundo semestre de 2020 por volume em MW.
Fonte: Greener (2021)

Para finalizar, a Figura 10 demonstra os inversores de potência acima de 50,0 kW mais procurados no mercado interno, sendo que no total de 33 fabricantes encontrada no país os 10 primeiros colocados correspondem a 78% do total importado (GREENER, 2021).

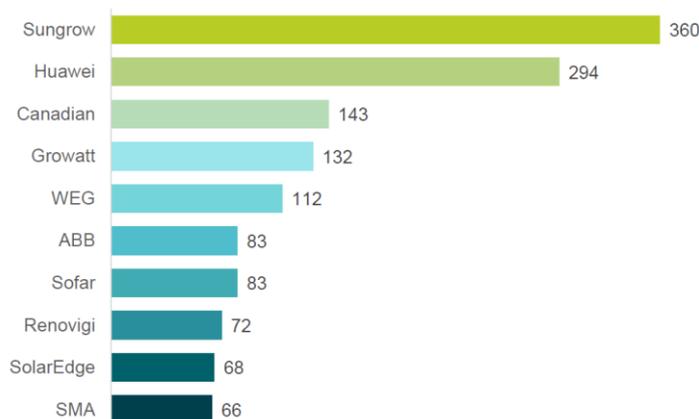


Figura 10 – inversores de potência acima de 50,0 kW importados no segundo semestre de 2020 por volume em MW.
Fonte: Greener (2021)

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localizações dos Experimentos

A pesquisa de campo foi desenvolvida em 3 locais, sendo em duas microgerações fotovoltaicas, tendo a primeira uma potência de 7,5 kW e a segunda uma potência de 5 kW, ambas localizadas na Universidade Estadual do Oeste do Paraná - *Campus* de Cascavel, conforme a Figura 11 e 12, e uma minigeração de 2,2 MW localizada na cidade Cascavel-PR, segundo a Figuras 13.



Figura 11 - Vista aérea - *Campus* de Cascavel – UNIOESTE.
Fonte: Assessoria de Comunicação Social – Reitoria - UNIOESTE

As localizações geográficas e os experimentos são:

- a) Sistema 1. Microgeração composta por 30 módulos fotovoltaicos policristalinos de 330 W e inversor bifásico de 7500 W, situado no laboratório LABTES com localização geográfica definida pelas coordenadas: latitude 24° 59' 17" sul, longitude 53° 26' 56" oeste, tal como flecha em amarelo indicado na Figura 8.

- b) Sistema 2. Microgeração composta por 10 módulos fotovoltaicos policristalinos de 330 Wp e inversor bifásico de 4.000 W, situado no laboratório do Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia - Projeto CASA com localização geográfica definida pelas coordenadas: latitude $24^{\circ} 59' 21''$ sul, longitude $53^{\circ} 26' 57''$ oeste, conforme flecha em amarelo indicado na Figura 12.



Figura 12 - Vista aérea - *Campus* de Cascavel – UNIOESTE. Flecha amarela indica o sistema de microgeração fotovoltaica localizado no laboratório LABTES e a flecha vermelha indica o sistema de microgeração fotovoltaica do Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia - Projeto CASA
Fonte: Autora.

- c) Sistema 3. Minigeração de 2,2 MW composta por 4 subsistemas de 300 kW compostos por 1080 módulos fotovoltaicos de 500 Wp e de 3 inversores de 100 kW (para cada subsistema) e 1 subsistema com 2.700 módulos fotovoltaicos de 500 Wp e 10 inversores de 100 kW, totalizando assim uma usina de 2,2 MW com 5.940 módulos fotovoltaicos de 500 Wp e 22 inversores de 100 kW situados na cidade de Cascavel-PR com localização geográfica definida pelas coordenadas: latitude $25^{\circ} 02' 30''$ sul, longitude $53^{\circ} 30' 57''$ oeste, de acordo com a flecha em amarelo indicada na Figura 13. Como o referido sistema é composto por inversores iguais, este estudo levantou os

dados de apenas um inversor de 100 kW responsável por 210 módulos fotovoltaicos de 500Wp.



Figura 13 - Vista aérea – Usina Olímpio – Cidade de Cascavel - PR
Fonte: Cristiano Fernando Lewandoski.

3.2. Características Técnicas dos Sistemas

As principais características dos Sistemas desse trabalho serão mencionadas entre as Tabelas 15 a 20.

a) Sistema 1: Microgeração fotovoltaica conectado à rede *on-grid* de 7,5 kW situada no laboratório do LABTES – do Campus de Cascavel.

Tabela 15 – Módulo solar fabricante Balfar Solar modelo BS72P-330W

Especificações		
Watts de Potência de Pico Máxima	Pm (Wp)	330
Tensão de Potência Máxima	Vm (V)	37,91
Corrente de Potência Máxima	Im (A)	8,71
Tensão de Circuito Aberto	Voc (V)	46,10
Corrente de Curto-circuito	Isc (A)	9,20
Eficiência do Módulo	(%)	17,1

Fonte: Balfar Solar.

Tabela 16- Inversor do Fabricante Shenzhen Sofar Solar – modelo Sofar 7.5KTLM

Entrada (CC)	
Tensão máxima de entrada	600 V
Faixa de voltagem do MPPT	90-580 V
Faixa de Tensão CC em carga total	250V-520 V
Corrente máxima de entrada	2x11 A/11 A
Corrente máxima de curto-circuito de entrada CC por MPPT	26.4/13.2 A
Nº de entradas MPP independentes	2
Saída (CA)	
Tensão CA nominal da rede	230V
Corrente CA nominal de saída	32,6 A
Frequência nominal de rede	50/60Hz
Potência nominal de saída	7500W
Fator de potência	1 (ajustável+/-0,8)
Grau de proteção	IP65
Faixa de temperatura de operação	(-)-30°C a (+)60°C
TDHi	< 3%

Fonte: Shenzhen Sofar Solar.

b) Sistema 2. Microgeração fotovoltaica conectada à rede *on-grid* situada no laboratório do Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia - Projeto CASA do *Campus* de Cascavel.

Tabela 17 – Módulo solar fabricante Risen Solar Technology modelo RSM72-6-330P

Especificações		
Watts de Potência de Pico Máxima	Pm (Wp)	330
Tensão de Potência Máxima	Vm (V)	37,55
Corrente de Potência Máxima	Im (A)	8,80
Tensão de Circuito Aberto	Voc (V)	45,70
Corrente de Curto-circuito	Isc (A)	9,30
Eficiência do Módulo	(%)	17,0

Fonte: Risen Solar Technology.

Tabela 18 - Inversor do Fabricante Solis Solar – modelo Solis 1P4K-4G

Entrada (CC)	
Tensão máxima de entrada	600 V
Faixa de voltagem do MPPT	100-500 V
Corrente máxima de curto-circuito de entrada CC por MPPT	2 x 11 A
Nº de entradas MPP independentes	2
Saída (CA)	
Tensão CA nominal da rede	220 V
Corrente CA nominal de saída	21 A
Frequência nominal de rede	50/60 Hz
Potência nominal de saída	4.000 W
Fator de potência	1 (ajustável+/-0,8)
Grau de proteção	IP65
Faixa de temperatura de operação	(-)25°C a (+)60°C
TDHi	< 3%

Fonte: Solis Solar.

- c) Sistema 3: Minigeração fotovoltaica conectado à rede *on-grid* denominada usina Olímpio de 2,2 MW localizado na cidade de Cascavel - PR

Tabela 19 – Módulo solar fabr. Risen Solar Technology modelo RSM150-8-500M

Especificações		
Watts de Potência de Pico Máxima	Pm (Wp)	500
Tensão de Potência Máxima	Vm (V)	42,88
Corrente de Potência Máxima	Im (A)	11,68
Tensão de Circuito Aberto	Voc (V)	51,01
Corrente de Curto-circuito	Isc (A)	12,46
Eficiência do Módulo	(%)	20,60

Fonte: Risen Solar Technology.

Tabela 20 - Inversor do Fabricante Shenzhen Sofar Solar – modelo Sofar 100KTL

Entrada (CC)	
Tensão máxima de entrada	625V
Faixa de voltagem do MPPT	500V-850V
Faixa de Tensão CC em carga total	250V-520V
Corrente máxima de entrada	26 ^a
Corrente máx. curto-circuito entrada CC por MPPT	40 ^a
Nº de entradas MPP independentes	10
Saída (CA)	
Tensão CA nominal da rede	3/N/PE, 230V/400Vac, 220V/380Vac
Corrente CA nominal de saída	160 A
Frequência nominal de rede	54 Hz - 66 Hz
Potência nominal de saída	100 kW
Fator de potência	1 (ajustável+/-0,8)
Grau de proteção	IP66
Faixa de temperatura de operação	(-)30°C a (+)60°C
TDHi	<3%

Fonte: Shenzhen Sofar Solar.

3.3. Analisador de Energia

Para o desenvolvimento deste estudo, foi instalado nos 3 sistemas um analisador de energia da marca FLUKE modelo FLUKE 1738 com objetivo de analisar os comportamentos das harmônicas de corrente e harmônicas de tensão. Um analisador de energia é utilizado para medir o fluxo de energia, tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada de sistema elétrico, detectando as características e manifestações das correntes e tensão, bem como as potências ativas, reativas, aparentes e fator de potência. Todas essas grandezas são coletadas na forma de raiz quadrada média (*rms*) ou valores fundamentais. Entretanto, uma das funções primordiais do analisador de energia é a capacidade de detectar e medir distorções harmônicas nas instalações elétricas.

Na pesquisa proposta, foi utilizado o analisador de energia do fabricante FLUKE modelo 1738 classe S, conforme Figura 14, que tem as seguintes especificações:

- Registrador de Energia + 4 garras de corrente flexível para medições CA de 1mA até 3000A (faixa de 300A a 3000A e precisão de $\pm(1\% + 0,03\%)$ e faixa de 4A a 40A e precisão de $\pm(0,7\% + 0,02\%)$).
- Tensão de 1000V com resolução de 0,1V e precisão de $\pm(0,2\% + 0,01\%)$.
- Frequência de 42,5 Hz até 69 Hz com resolução de 0,01 Hz e precisão de $\pm(0,1\%)$
- Harmônicas de tensão do 2° ao 50° de até 1000V com resolução de 0,1V precisão $> 10 V: \pm 5 \%$ da leitura $< 10 V: \pm 0,5V$
- Harmônicas de corrente da 2° ao 50° de até 3000A com resolução de 1A e precisão $\geq 3 \%$ da gama de corrente $\pm 5 \%$ da leitura $< 3 \%$ da gama de corrente: $\pm 0,15 \%$ da gama
- Capacidade de memória normalmente 10 sessões de registo de 8 semanas com intervalos de 1 minutos e 500 eventos;
- Realiza medição dos parâmetros de qualidade de energia: Tensão, frequência, desequilíbrio, harmônicos de tensão, TDH_V, corrente, harmônicos, TDH_I, TDD.
- Harmônicos individuais do 2° ao 50°.
- Conformidade com os padrões IEC 61000-4-7: Classe 1 e IEEE 519 (harmônicos de curta duração), relacionados aos harmônicos.



Figura14 - Analisador de qualidade de energia FLUKE modelo 1738.

Fonte: Fluke Corporation.

3.4. Método da Aquisição de Dados

Este trabalho é uma pesquisa em que as fontes de dados são de campo, uma vez que o procedimento da coleta de dados ocorreu a partir de um estudo de caso sobre a verificação da qualidade de energia de duas microgerações fotovoltaicas presentes nas instalações do *Campus* de Cascavel da UNIOESTE e minigeração fotovoltaica da usina Olímpio localizada na cidade de Cascavel-PR.

Por se tratar de sistema fotovoltaico *on grid*, ou seja, sistema de geração de energia com possibilidade de injetar diretamente a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos na rede elétrica do sistema de distribuição, o proposto estudo adotou as exigências mínimas de leituras válidas, segundo o módulo 8 do PRODIST de 7 de dezembro de 2021, que preconiza 1.008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, equivalendo no mínimo 168 horas, sendo que esta quantidade mínima de amostras se refere a um período de 7 dias.

A fim de aferir os dados coletados nos três sistemas estudados, foi estipulada com norma de referência do presente trabalho a norma da ABNT NBR 16.149 relacionada aos Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.

As grandezas medidas foram:

- a) Frequência;
- b) Tensão;
- c) Corrente;
- d) Distorção harmônica total de tensão (THD-V);
- e) Distorção harmônica total de corrente (THD-I);
- f) Potência.

Kagan (2009) esclarece que, na prática, é usual considerar até as harmônicas de 49ª ordem a fim de se obter boa precisão nos resultados. Em razão disto, este trabalho mediu as distorções harmônicas de tensão e corrente até 50ª par e 49ª ímpar, sendo que as medições das grandezas, nos três sistemas, foram estudadas por meio do software *Fluke Energy Analyze Plus 3.9*.

Outra ponderação a ser feita no trabalho trata-se da opção por analisar todos os sistemas dentro de 7 ciclos fechados de 24 horas, totalizando 1 semana, porém as leituras ocorreram, de fato, em todos os sistemas, em períodos superiores

a 7 dias. Essa medida foi tomada a fim de garantir pelo menos 1008 leituras preconizadas pelo módulo 8 do PRODIST, caso ocorressem registros de valores não válidos durante o período de aquisição de dados.

3.1.1. Dados do sistema fotovoltaico 1 – Laboratório do LABTES

Sistema com 30 módulos policristalinos de 330 W com potência total de 9,9 kWp e inversor bifásico de 7,5kW localizado no telhado do bloco de laboratório do LABTES – Campus Cascavel – UNIOESTE (Figura 15).



Figura 15 - Laboratório do LABTES – Campus Cascavel – UNIOESTE.
Fonte: Autora

Os dados monitorados neste sistema 1 foram coletados na saída do inversor, tal como pode ser constatado na Figura 16, entre os dias 13/05/2022 ao dia 21/05/2022 e foram computadas 1.153 amostras a cada 10 minutos. Entretanto, no estudo realizado optou por estudar apenas os dias compreendidos entre 14/05/2022 a 20/05/2022, que se referem aos dias com dados de ciclo de 24 horas.



Figura 16 – Ponto de coleta dos dados do laboratório LABTES.

Fonte: Autora

3.1.2. Dados do sistema fotovoltaico 2 - Laboratório do Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia - Projeto CASA

Sistema com 10 módulos policristalinos de 330 Wp com potência total de 3,3 kWp e inversor de 4 kW localizado em solo pertencente ao sistema do projeto CASA – Campus Cascavel – UNIOESTE, conforme Figura 17.



Figura 17 - Microgeração fotovoltaica pertencente ao sistema do projeto CASA – Campus Cascavel – UNIOESTE.

Fonte: Autora

Para este sistema, 2 foram coletados na saída do inversor, conforme pode ser constatado na Figura 18, do dia 25/05/2022 até o dia 02/06/2022, sendo computadas 1.147 amostras a cada 10 minutos. Da mesma forma, aqui foram analisados dados compreendidos do dia 26/05/2022 até 1ª/06/2022.

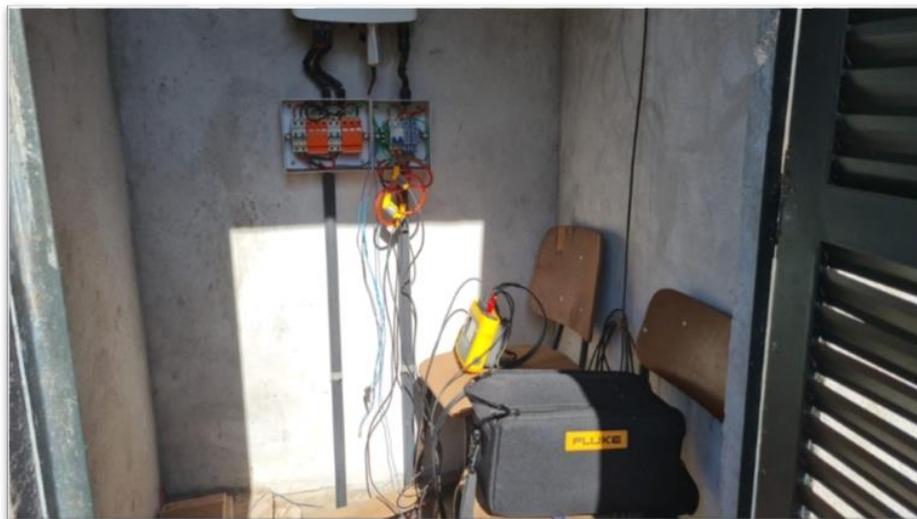


Figura 18 – ponto de coleta dos dados do projeto CASA.
Fonte: Autora.

3.1.3. Dados do sistema fotovoltaico 3 – Minigeração fotovoltaica Usina Olímpio de 2,2 MW localizado na cidade de Cascavel - PR

No caso desse subsistema, por se tratar de 22 inversores do mesmo fabricante, o mesmo modelo foi optado por analisar apenas uma parte dessa usina compreendido por 270 módulos monocristalinos de 500 W com potência total de 135 kWp e inversor Sofar Solar de 100 kW da usina Olímpio localizado na cidade de Cascavel- PR, conforme as Figuras 19 e 20.



Figura19 - Minigeração fotovoltaica Usina Olímpio de 2,2 MW localizado na cidade de Cascavel – PR.

Fonte: Cristiano Fernando Lewandoski



Figura 20 - Minigeração fotovoltaica Usina Olímpio de 2,2 MW localizado na cidade de Cascavel – PR.

Fonte: Autora

Para este sistema, 3 foram coletados na saída do inversor, conforme pode ser constatado na Figura 21, entre os dias 01/07/2022 ao dia 12/07/2022. Foram computadas 1.585 amostras a cada 10 minutos, sendo que os dados analisados se encontram entre as datas de 02/07/2022 a 08/07/2022.



Figura 21 – Ponto de coleta dos dados do inversor de 100 kW da usina Olímpio.
Fonte: Autora

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, foram analisadas as grandezas elétricas tais como tensão, corrente, frequência e potência, assim como os parâmetros de qualidade de energia compostos por distorção total e harmônicas da tensão; distorção total e harmônicas da corrente das duas microgerações fotovoltaicas e da minigeração fotovoltaica.

4.1 Resultados do Sistema 1 – LABTES: Inversor de 7,5 kW

4.1.1 Tensão, Corrente e Frequência

No período de monitoramento, foram registradas as grandezas que podem ser conferidas a partir das Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 – Grandezas registradas na fase AN do sistema 1 – inversor de 7,5 kW

Grandeza	Fase NA		
	Valor	Data	Hora
Tensão Máxima	126,5 V	20/05/2022	12:30
Tensão Mínima	114,0 V	17/05/2022	16:00
Tensão Média	122,4 V		
Corrente Máxima	29,07 A	19/05/2022	12:20
Corrente Mínima	0,14 A	14/05/2022	06:50
Corrente Média	2,99^a		

Fonte: Autora.

Tabela 22 – Grandezas registradas na fase BN do sistema 1 – inversor de 7,5 kW

Grandeza	Fase BN		
	Valor	Data	Hora
Tensão Máxima	127 V	19/05/2022	13:00
Tensão Mínima	115,4 V	14/05/2022	10:30
Tensão Média	123,0 V		
Corrente Máxima	28,86 A	19/05/2022	12:20
Corrente Mínima	0,16 A	15/05/2022	06:40
Corrente Média	2,98 A		

Fonte: Autor.

Determinados equipamentos sofrem redução da vida útil e apresentam menores rendimentos quando são operados sob tensões superiores ou inferiores a faixa de operação a partir da qual foram projetados (KAGAN, 2009). A fim de estabelecer uma margem de tensão aceitável e incapaz de provocar danos aos equipamentos, o Módulo 8 do PRODIST preconiza que a tensão nominal adequada para o sistema 220 V deve estar dentro da faixa ($117 \leq TL \leq 133$) e ambas as tensões das fases A e B com referência ao neutro registraram momentos abaixo do desejado, pois evidenciaram 114 V e 115,4 V, respectivamente. Entretanto, mantiveram a média da tensão dentro dos limites preconizado em norma.

A variação da corrente, como esperado, está em função da incidência solar, sendo que o valor máximo da corrente ficou próximo do valor máximo estipulado pelo inversor do sistema 1, isto é, a máxima corrente estipulada pelo inversor é de 32,6 A e as fases AN e BN registraram 29,07 A (89,17% do valor de placa) e 28,86 A (88,52% do valor de placa). Contudo, a corrente média da semana avaliada está muito aquém do valor nominal, caracterizando clima com muito sombreamento.

No que se refere à frequência, Martinho (2013) elucida que a origem normalmente está na geração de energia e pode afetar alguns equipamentos, sendo os limites da variação para o sistema de distribuição de energia e, conseqüentemente, para as instalações de geração conectadas a ela, devem estar dentro dos valores que vão de 59,90 Hz a 60,10 Hz, conforme PRODIST módulo 8.

Na Tabela 23, são mostrados os valores da frequência do sistema 1 – inversor de 7,5 kW. A Figura 18 mostram por conseguinte, o gráfico da frequência do sistema 1 durante todo o período estudado.

Tabela 23 – Frequências registradas no sistema 1 – inversor de 7,5 kW

Grandeza	Valor	Data	Hora
Frequência Máx.	60,12 Hz	20/05/2022	12:10
Frequência Média Linear	60 Hz		
Frequência Mín.	59,87 Hz	17/05/2022	06:20

Fonte: Autor.

Percebe-se que o sistema 1 registrou valores meramente fora da faixa de frequência recomendável, e possivelmente por momentos curtos, já que a frequência média linear se manteve do valor de 60Hz, conforme Figura 22.

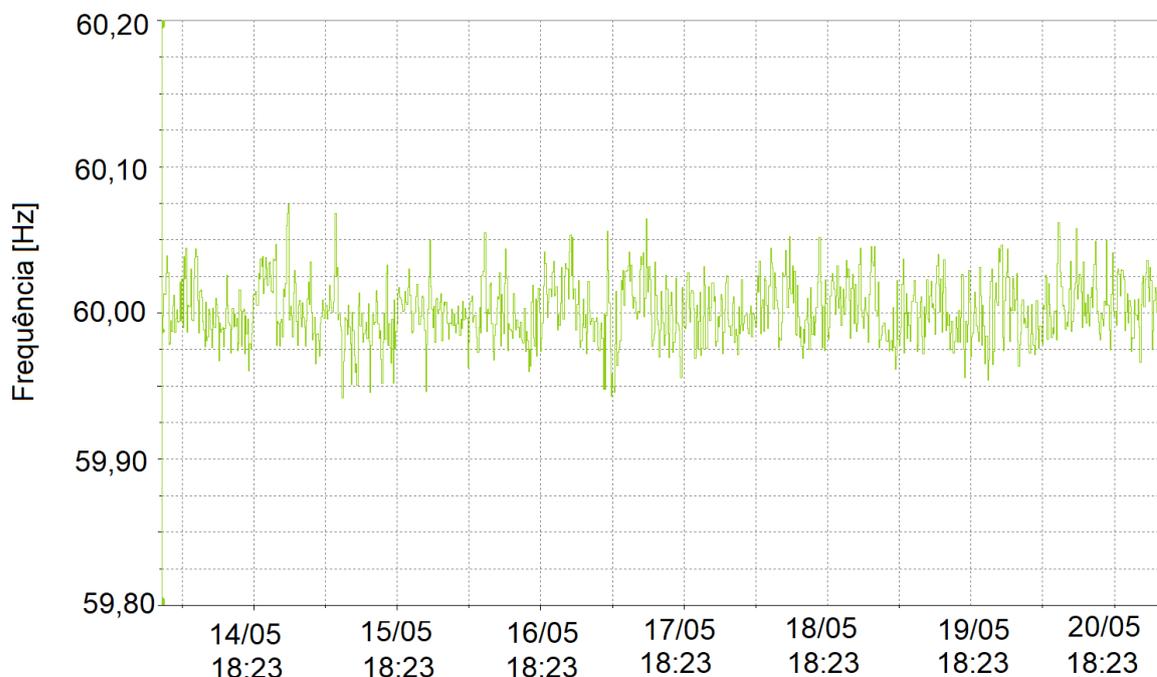


Figura 22 – Frequência Média em Hz do inversor do sistema 2 - inversor de 7,5 kW registrado entre o dia 14/05/2022 e 20/05/2022.

Fonte: Autora.

4.1.2 Distorção harmônica total e harmônicas da tensão

Sobre a qualidade de energia da tensão, os limites máximo e mínimo e média linear das distorções de harmônicas totais para as fases AN e BN, respectivamente, podem ser constatados nas Tabelas 24 e 25.

Tabela 24 – TDH da tensão registrada na fase AN do sistema 1 – inversor de 7,5 kW

Grandeza	Fase NA		
	Valor	Data	Hora
V TDH Máx.	1,8 %	15/05/2022	18:10
V TDH Média Linear	1,1%	-	-
V TDH Mín	0,53 %	21/05/2022 ²²	11:20

Fonte: Autora.

Tabela 25 – TDH da tensão na registrada fase BN do sistema 1 – inversor de 7,5 kW

Grandeza	Fase BN		
	Valor	Data	Hora
V TDH Máx.	1,6 %	15/05/2022	17:50
V TDH Média Linear	0,98 %	-	-
V TDH Mín.	0,50 %	21/05/2022	11:20

Fonte: Autora.

As informações do inversor de 7,5kW do sistema 1 coletados de 13 de maio de 2022 até o dia 21 de maio de 2022 não registraram distorções harmônicas totais da tensão (THD V) acima do que é estabelecido pela PRODIST - Módulo 8 da ANEEL (2021), que corresponde a 10,0%, tanto na fase AN quando na fase BN.

A Figura 23 representa as harmônicas da tensão em ambas as fases A e B em relação ao neutro até a 13ª ordem, incluindo a ausência da componente cc.

²² Para o sistema I – inversor de 7,5kW, optou-se por analisar ciclo diários completos de 24 horas entre os dias 14/05/2022 a 20/05/2022, a fim de facilitar as comparações diárias entre os sistemas. Mesmo que o menor valor de distorção harmônica tenha ocorrido no dia 21/05/2022, sendo que os registros dos dados encerraram às 15h02min, e não completou o ciclo diário.

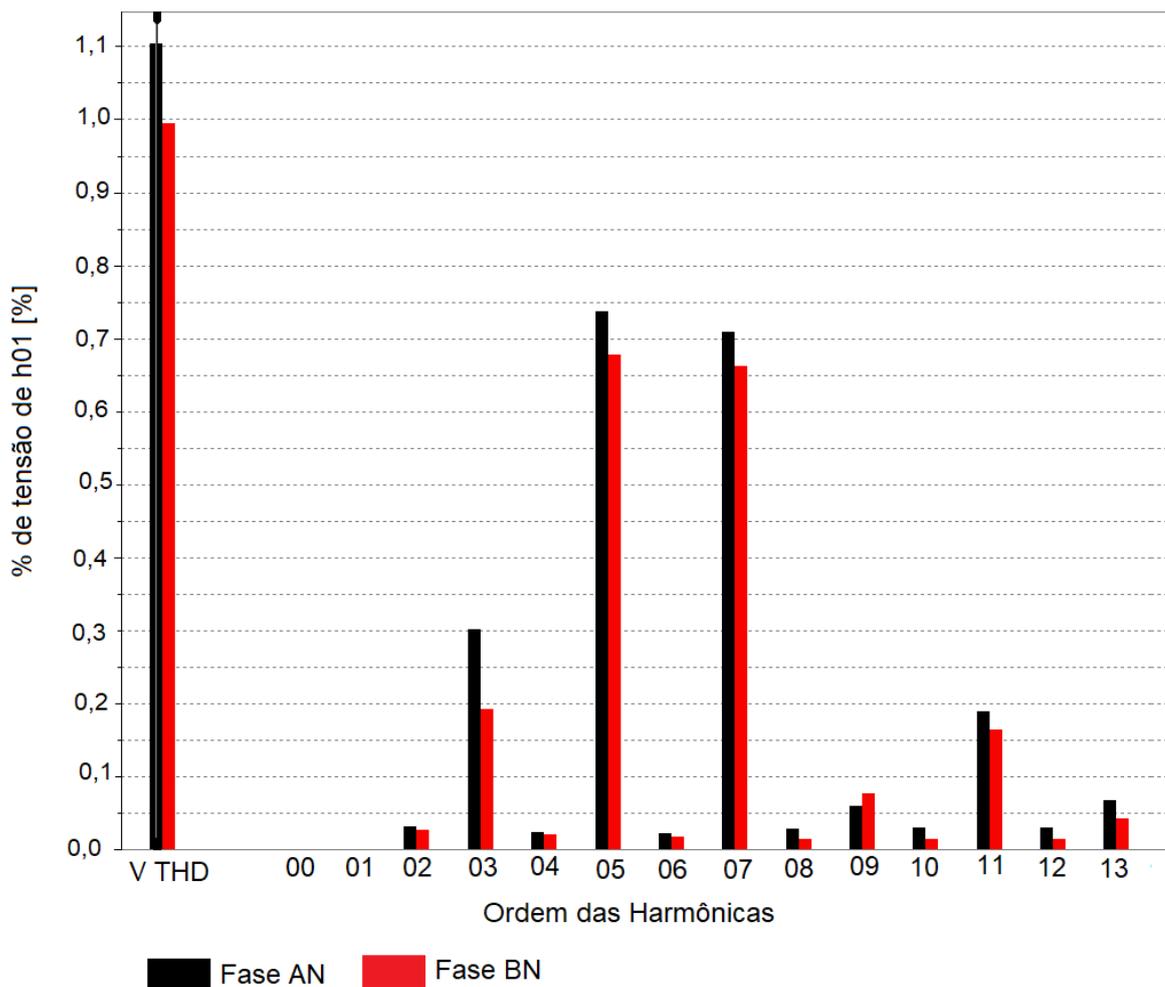


Figura 23 – Histograma da THD da tensão e harmônicas até 13ª ordem em percentual em relação à harmônica fundamental – h01 para as fases AN e BN respectivamente do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.

Fonte: Autora.

Capelli (2013) explica que os inversores de frequência provocam harmônicas significativas de quinta, sétima, décima primeira e décima terceira ordem. A Figura 20 mostra, em ambas as fases, que as distorções harmônicas da 5ª e 7ª ordem possuem os maiores percentuais do espectro e que as harmônicas pares são menos significativas que as harmônicas ímpares. Além disso, o sinal do inversor não apresentou a presença da componente cc, uma vez que a harmônica de ordem zero não existe.

4.1.2.2 Distorção harmônica total e harmônicas da Corrente

Martinho (2013) esclarece que os inversores são responsáveis pela distorção de correntes causando as correntes harmônicas na linha. Apesar disto, a Tabela 26 mostra que o valor médio da distorção harmônica da corrente não ultrapassou os 5% recomendados pela norma NBR 16.149.

Tabela 26 – TDH da corrente nas fases A e B do sistema 1 – inversor de 7,5 kW

Grandeza	Valor		Data	Hora
	Fase A	Fase B		
A TDH Máx.	11,7%	11,6 %	15/05/2022	17:40
A TDH Média Linear	3,1%	3,1%	-	-
A TDH Mín	1,8%	1,8 %	19/05/2022	12:20

Fonte: Autora.

A Tabela 27 salienta o comportamento da corrente, da tensão ativa e da taxa de distorção harmônica da corrente do inversor de 7,5 kW do sistema 1.

Essa correlação oferta condições de entender que tanto a potência quanto a corrente e as distorções harmônicas do sistema fotovoltaico estão sobre a influência da incidência solar e, conseqüentemente, do sombreamento.

Tabela 27 – Comportamento da corrente, potência ativa e TDH da corrente diária do sistema 1 – inversor de 7,5 kW

Data	Corrente [A]	Potência Ativa [W]	A TDH [%]
14/05/2022 Sábado			
15/05/2022 Domingo			
16/05/2022 Segunda-feira			

Data	Corrente [A]	Potência Ativa [W]	A TDH [%]
17/05/2022 Terça-feira			
18/05/2022 Quarta-feira			
19/05/2022 Quinta-feira			
20/05/2022 Sexta-feira			

Fonte: Autora.

Tal como consta na Tabela 27, os dias de menor incidência solar e, por conseguinte, de menores valores de corrente e potência ativa, também foram os dias que geraram a maior quantidade de distorções harmônicas. Soares *et al*, (2021) esclarece que as distorções das harmônicas de correntes, em muitos casos, tendem a ser maiores no começo da manhã e no final da tarde.

Em termos de distorções harmônicas, escolheu-se dois momentos peculiares para que fossem analisados, sendo o dia 16/05/2022, que apresentou um dos melhores aproveitamentos das incidências solares do período estudado, o que pode ser conferido pelo comportamento dos gráficos da Tabela 27. O segundo momento trata-se do dia 18/05/2022, registrando um dos menores valores da potência, o que também pode ser observado na Figura 24.

Em todos os casos neste estudo, quando se trata de informação foi levada em conta apenas a fase A, pois as fases B ou C registraram valores muitíssimos próximos da fase A, com apenas algumas variações irrelevantes.

A fim de ficar mais claro, as próximas Figuras mostram os valores da potência ativa e da taxa de distorção harmônica da corrente durante o intervalo em que houve incidência solar, desconsiderando quase todos os horários nos quais o

sol havia se posto, ou seja, são valores demonstrados apenas entre 06:00h e 20:00h.

A Figura 24 mostra o comportamento da potência média em Watts do dia 16/05/2022 do inversor 7,5 kW do sistema 1 durante o ciclo em que houve incidência solar.

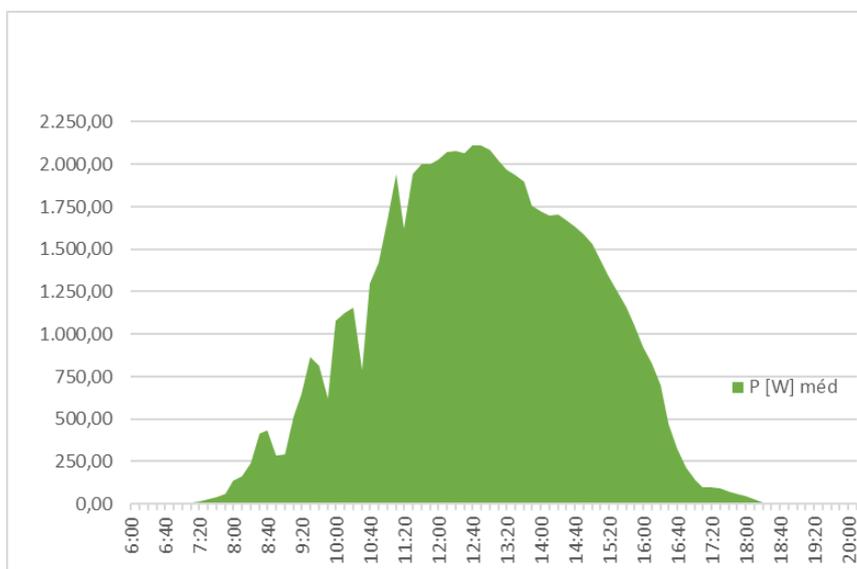


Figura 24 – Potência média em Watts do inversor de 7,5 kW do sistema 1 registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 16/05/2022.

Fonte: Autora.

A Figura 25 apresenta os valores da taxa de distorção harmônica do inversor de 7,5 kW durante o dia 16/05/2022.

Caso sejam vistos apenas os valores médios das distorções harmônicas na corrente, será possível notar que ocorreram pouquíssimos momentos em que esses valores ultrapassaram os 5% preconizados pela norma. Percebe-se que as raras ocorrências de ultrapassagem do valor de 5% da distorção de harmônicas das correntes ocorreram em um espaço de tempo muito curto, durante o início da manhã e no final da tarde, visto que coincidem com os horários de menores incidências solares.

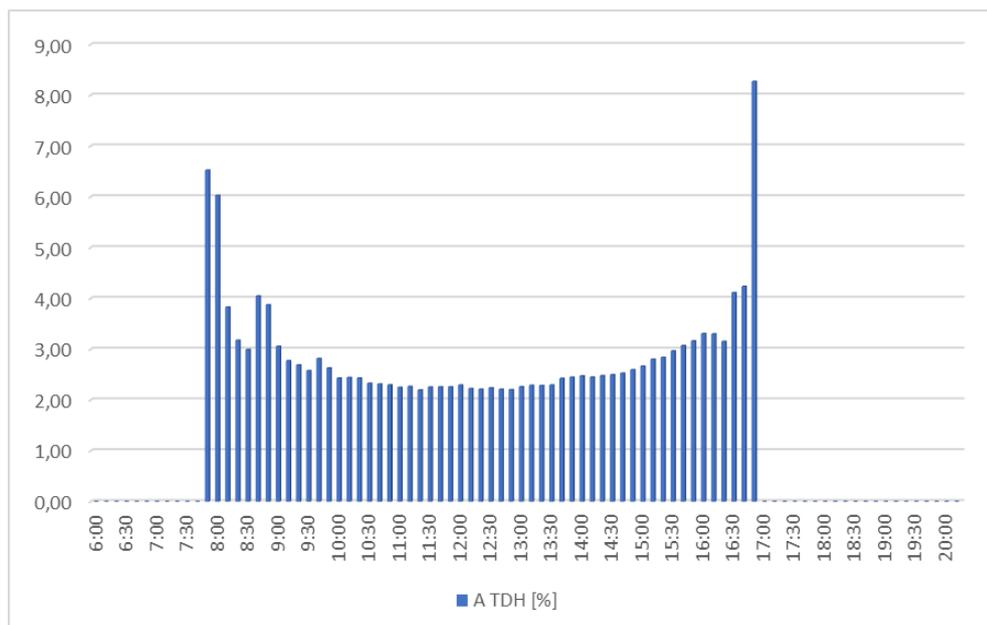


Figura 25 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor de 7,5 kW do sistema 1 registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 16/05/2022.

Fonte: Autora.

Corroborando com as Figuras 20 e 21, é possível constatar na Figura 26 a combinação dos gráficos de potência ativa em porcentagem da potência nominal do inversor e da taxa de distorção harmônica da corrente, também em porcentagem, no dia 16/05/2022.

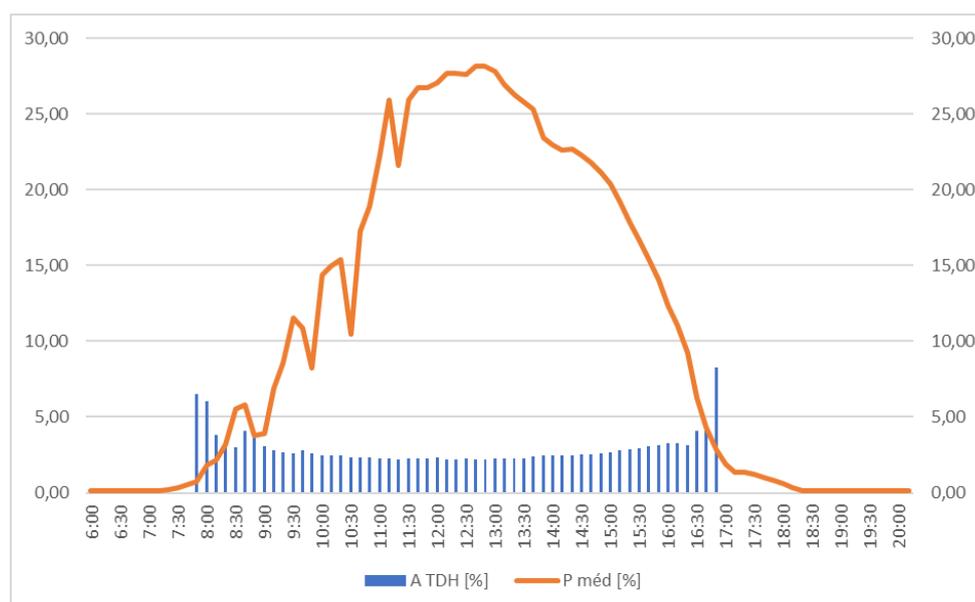


Figura 26 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor do sistema 1 de 7,5 kW e a potência (em %) das 06:00h às 20:00h no dia 16/05/2022.

Fonte: Autora.

É essencial esclarecer que os impactos harmônicos mais significativos ocorrem quando a produção do inversor está muito abaixo da sua capacidade nominal, visto que este período geralmente corresponde aos momentos de baixa insolação (FORTES, 2018).

Na Figura 26, fica evidenciado que o inversor 7,5 kW do sistema 1, apesar do baixo carregamento no período analisado, que se trata do dia 16/05/2022, em poucos momentos ultrapassou o valor recomendado em norma (5%).

Pode-se também destacar a leitura realizada no dia 18/05/2022, que ressaltou um dos piores valores de carregamento do inversor, como pode ser conferido na Figura 27.

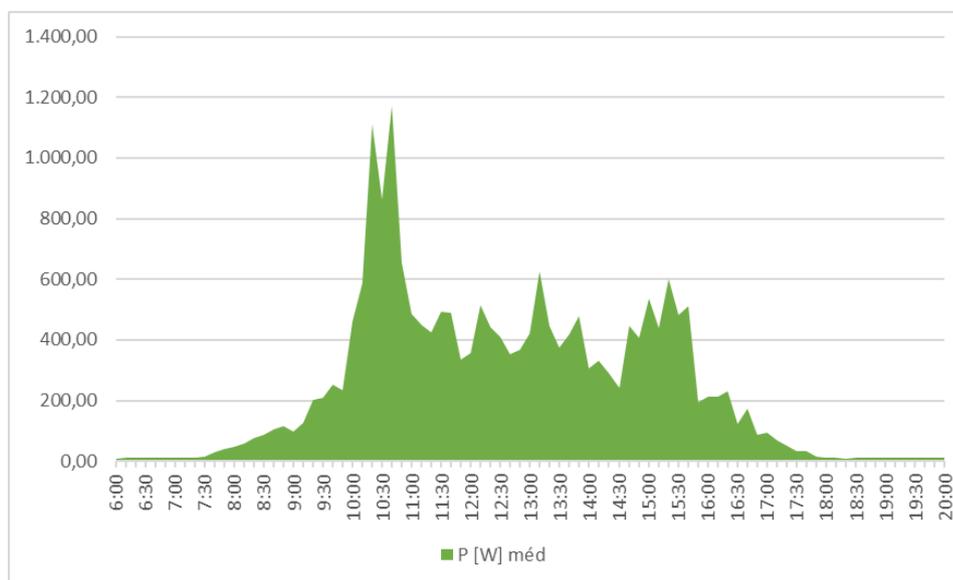


Figura 27 – Potência média em W do inversor do sistema 1 de 7,5 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 18/05/2022.

Fonte: Autora.

Percebe-se que, na Figura 28, durante o intervalo das 10:00h às 11:00h, a potência do inversor de 7,5 kW estava inferior aos 20% de sua potência nominal.

A Figura 28 traz a taxa de distorção harmônica da corrente durante o dia 18/05/2022. Percebe-se que, mesmo sendo um período com maior sombreamento que o dia 16/05/2022, foram poucos os momentos em que a TDH da corrente ultrapassou valores limites da norma.

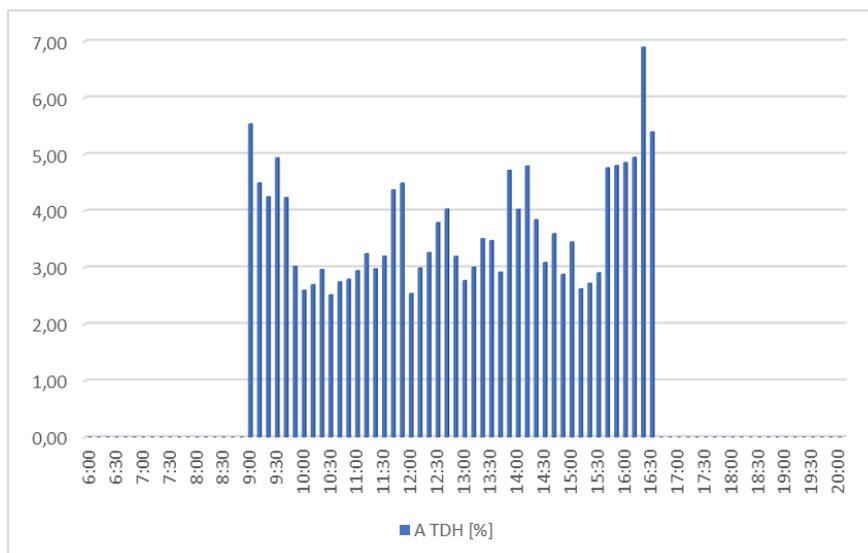


Figura 28 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor do sistema 1 de 7,5 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 18/05/2022.

Fonte: Autora.

A Figura 29 ressalta a porcentagem da potência ativa em relação à potência nominal do inversor e a taxa de distorção de harmônicas da corrente do dia 18/05/2022.

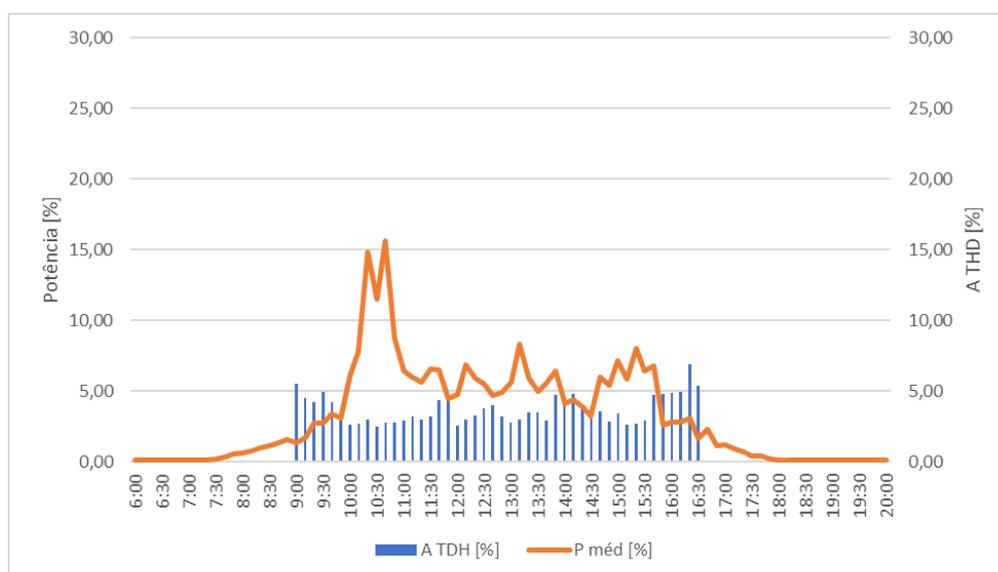


Figura 29 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor e a potência (em %) do sistema 1 de 7,5 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 18/05/2022.

Fonte: Autora.

Como pode ser observado na Figura 29, que demonstra a curva em porcentagem da potência do inversor de 7,5 kW e a produção, também em porcentagem, de harmônicas para o período estabelecido, constata-se que as distorções harmônicas possuem valores dentro do limite de 5% em quase todo o período estudado, mesmo quando o inversor trabalha abaixo de 20% de sua potência nominal. Fortes (2018) menciona, inclusive, que as distorções harmônicas são mais significativas quando o ponto de operação do inversor é inferior a 20%.

A Figura 30 mostra a taxa de distorções harmônicas - TDH da corrente e o comportamento das harmônicas até a 13ª ordem do período compreendido entre 14/05/2022 a 20/05/2022.

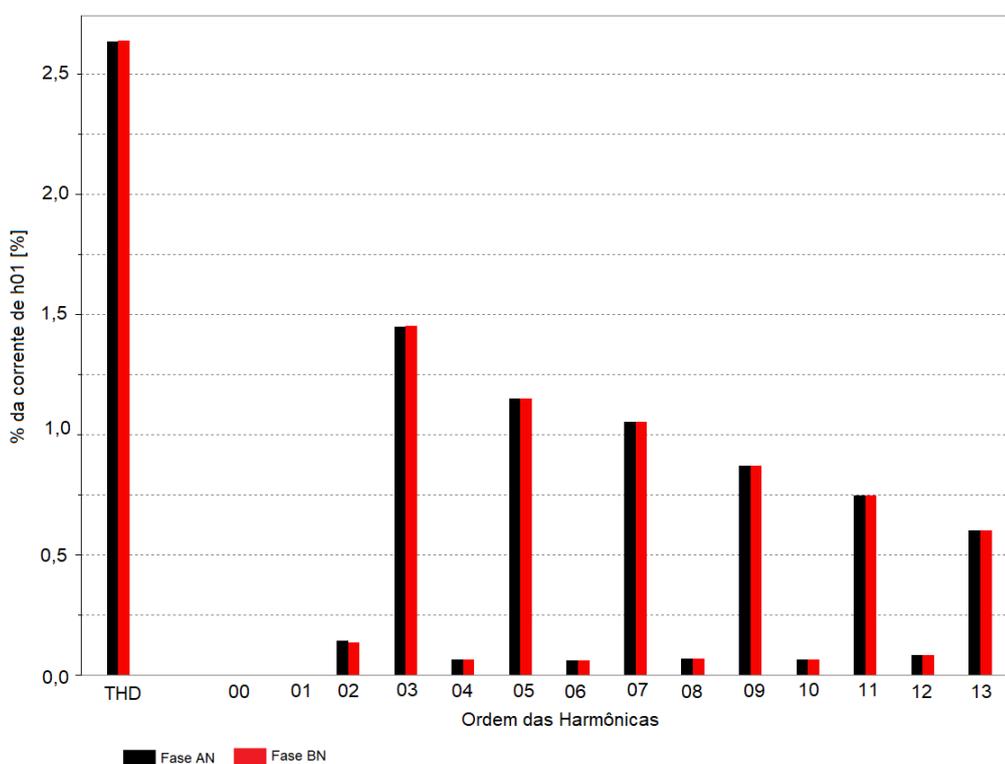


Figura 30 – Histograma da THD da corrente e harmônicas até 13ª ordem em percentual em relação à harmônica fundamental para as fases AN e BN respectivamente do sistema 1 – inversor de 7,5 kW.

Fonte: Autora.

Percebe-se que, pela Figura 30, o inversor de 7,5 kW do sistema 1 teve valores inferiores aos da Tabela 9, que preconiza os limites para a distorção harmônica da corrente do inversor, bem como o limite das distorções harmônicas individuais.

Outro fato relevante, mesmo que as distorções das harmônicas individuais estejam abaixo do limite permitido, diz respeito ao fato de que as harmônicas de ordem ímpar foram responsáveis pelos maiores valores de distorções.

4.2 Resultados do Sistema 2 – LABORATÓRIO CASA: Inversor de 4 kW

4.2.1 Tensão, Corrente e Frequência

No período de monitoramento, foram registradas as grandezas seguintes, com base nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 28 – Grandezas registradas na fase AN do sistema 2 – inversor de 4 kW

Grandeza	Fase NA		
	Valor	Data	Hora
Tensão Máxima	131,1 V	31/05/2022	18:50
Tensão Mínima	120,4 V	27/05/2022	08:30
Tensão Média		128,5 V	
Corrente Máxima	12,51 A	28/05/2022	12:30
Corrente Mínima	0,08 A	02/06/2022	08:20
Corrente Média		0,89 A	

Fonte: Autora.

Tabela 29 – Grandezas registradas na fase BN do sistema 2 – inversor de 4 kW

Grandeza	Fase BN		
	Valor	Data	Hora
Tensão Máxima	136,0 V	28/05/2022	14:40
Tensão Mínima	114,9 V	30/05/2022	08:20
Tensão Média		128,8V	
Corrente Máxima	12,43 A	28/05/2022	12:30
Corrente Mínima	0,13 A	25/05/2022	19:20
Corrente Média		0,90 A	

Fonte: Autor.

Tal como ocorre no sistema 1, a tensão nominal do sistema 2 deve estar dentro da faixa ($117 \leq TL \leq 133$). Apenas a fase B, com referência ao neutro, registrou momentos abaixo do desejado, pois registrou tensão mínima de 114,9 V. Entretanto, o valor médio de ambas as fases está dentro do valor preconizado pela ANEEL.

Por sua vez, no sistema 2, a máxima corrente do inversor é de 21 A e as fases AN e BN registraram 12,51 A (59,57% do valor de placa) e 12,43 A (59,19% do valor de placa), o que caracteriza dias com baixa incidência solar. Mas o que se ressalta é a média da corrente durante a semana analisada, que ficou muito abaixo da corrente nominal, caracterizando uma semana com predominância de tempo nublado e baixa incidência solar.

Na Tabela 30, são apresentadas as frequências registradas no sistema 2.

Tabela 30 – Frequências registradas no sistema 2 – inversor de 4 kW

Grandeza	Valor	Data	Hora
Frequência Máx.	60,13 Hz	30/05/2022	08:20
Frequência Média Linear		60 Hz	
Frequência Mín.	59,85 Hz	28/05/2022	17:40

Fonte: Autor.

No que se refere à frequência, caso seja comparada aos valores ideais que abrangem a faixa de 59,90 Hz a 60,10 Hz, constatou-se que o sistema 2 registrou valores meramente fora desta faixa, porém manteve uma frequência média linear de 60Hz.

Por sua vez, a Figura 31 mostra o registro da frequência do sistema 2 – inversor de 4 kW durante todo o período estudado.

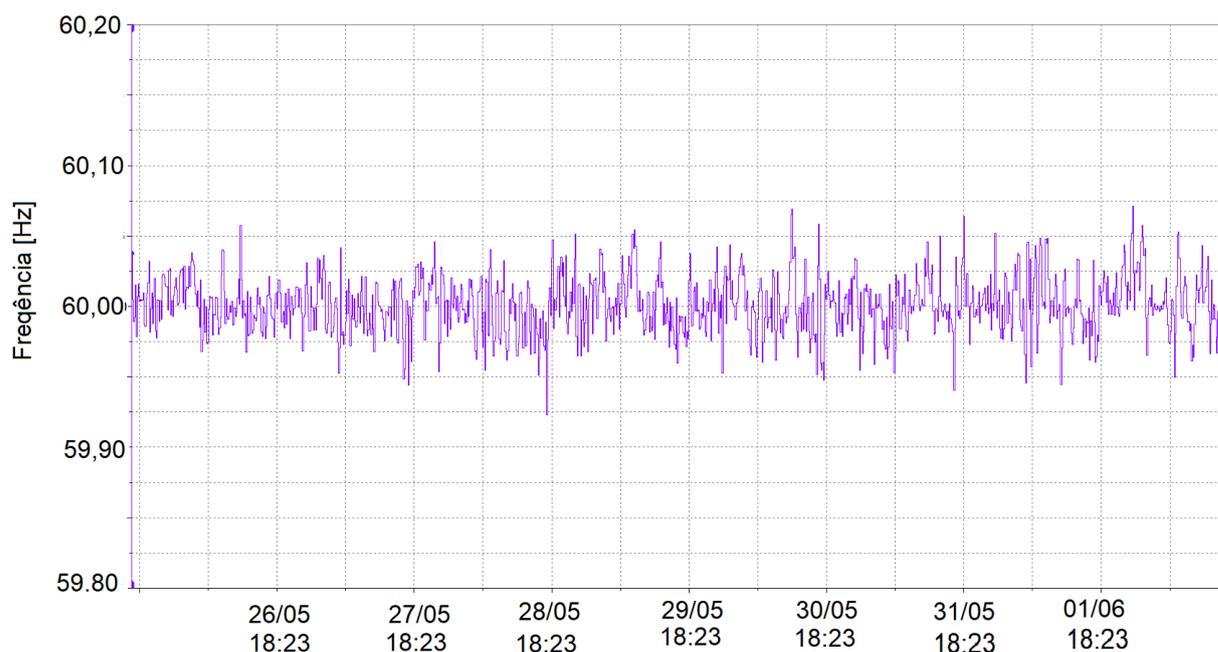


Figura 31 – Frequência Média em Hz do inversor do sistema 2 registrado entre o dia 25/05/2022 e 02/06/2022.

Fonte: Autora.

4.2.2 Distorção harmônica total e harmônicas da tensão

Sobre a qualidade de energia da tensão, os limites máximo, mínimo e a média linear das distorções de harmônicas totais para as fases AN e BN, respectivamente, podem ser constatados nas Tabelas 31 e 32.

Tabela 31 – TDH da tensão registrada na fase AN do sistema 2 – inversor de 4 kW

Grandeza	Fase NA		
	Valor	Data	Hora
V TDH máx.	3,7 %	28/05/2022	13:20
V TDH Média Linear	1,4%	-	-
V TDH mín.	0,60 %	26/05/2022	08:30

Fonte: Autora.

Tabela 32 – TDH da tensão registrada na fase BN do sistema 2 – inversor de 4 kW

Grandeza	Fase BN		
	Valor	Data	Hora
V TDH máx.	3,7 %	27/05/2022	20:40
V TDH Média Linear	1,6 %	-	-
V TDH mín.	0,78 %	27/05/2022	07:10

Fonte: Autora.

As informações do inversor de 4 kW do sistema 2, coletadas entre os dias 25 de maio de 2022 ao dia 2 de junho de 2022, não registraram distorções harmônicas totais da tensão (THD V) acima do que é estabelecido pela PRODIST - Módulo 8 da ANEEL (2021), que corresponde a 10,0%, tanto na fase NA quanto na fase BN.

A Figura 32 mostra, em ambas as fases, as distorções harmônicas.

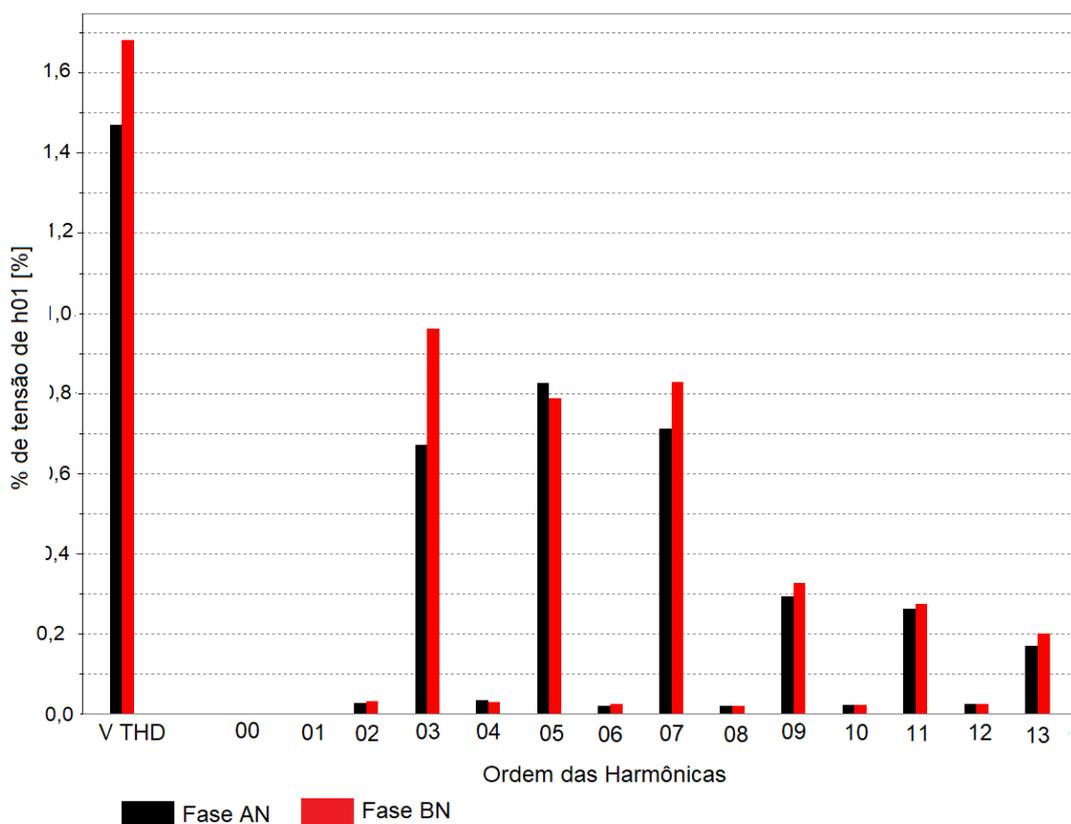


Figura 32 – Histograma da THD da tensão e harmônicas até 13ª ordem (em %) em relação à harmônica fundamental para as fases AN e BN, respectivamente do sistema 2 – inversor de 4 kW.

Fonte: Autora.

Percebe-se que as harmônicas da 3^a, 5^a e 7^a ordem possuem os maiores percentuais e que as harmônicas pares são menos significativas que as harmônicas ímpares. Além disso, o sinal do inversor não apresentou a presença da componente cc, uma vez que a harmônica de ordem zero não existe.

4.2.2.2 Distorção harmônica da Corrente e Potência Ativa

Segundo a NBR 16.149/2013, a distorção harmônica da corrente na potência nominal do inversor não deve ultrapassar 5%. Entretanto, tanto a fase A quanto a fase B registraram o TDH médio da corrente duas vezes maior que o valor permitido, como pode ser constatado na Tabela 33.

Tabela 33 – TDH da corrente nas fases A e B do sistema 2 – inversor de 4 kW

Grandeza	Valor		Data	Hora
	Fase A	Fase B		
A TDH Máx.	56,9%	56,1%	31/05/2022	09:40
A TDH Média Linear	10,6%	10,5%	-	-
A TDH Mín.	2,3%	2,4%	26/05/2022	10:40

Fonte: Autora.

A seguir, na Tabela 34, é mostrado o comportamento da corrente, da potência ativa e da taxa de distorção harmônica da corrente do inversor do 4kW do sistema 2.

Tal como consta na Tabela 34, os dias com menor incidência solar e, conseqüentemente, menores valores de corrente e potência ativa, também foram os dias que geraram as distorções harmônicas mais expressivas.

Tabela 34 – Comportamento da corrente, potência ativa e TDH da corrente diária do sistema 2 – inversor de 4 kW

Data	Corrente [A]	Potência Ativa [W]	A TDH [%]
26/05/2022 Quinta-feira			
27/05/2022 Sexta-feira			
28/05/2022 Sábado			
29/05/2022 Domingo			
30/05/2022 Segunda-feira			
31/05/2022 Terça-feira			
01/06/2022 Quarta-feira			

Fonte: Autora.

De acordo com o que ocorreu no caso do sistema 1, aqui no sistema 2 foram escolhidos dois momentos peculiares para ser analisados, sendo o dia 28/05/2022, que apresentou um os melhores aproveitamentos das incidências solares do período estudado, o que pode ser conferido pelo comportamento dos gráficos da Tabela 35. O segundo momento se trata do dia 31/05/2022, que registrou um dos menores

valores de corrente e, ao mesmo tempo, valores expressivos de distorção harmônica da corrente.

Para que fique mais claro, as Figuras 29 e 30 mostram os valores da potência ativa e da taxa de distorção harmônica da corrente durante o intervalo em que ocorreu incidência solar, desconsiderando quase todos os horários nos quais o sol havia se posto, isto é, são valores registrados no dia 27/05/2022 das 06:00h às 20:00h.

A Figura 33 demonstra que a potência do inversor alcançou os maiores valores em torno do horário que abrangeu o período das 11:00h às 13:00h, aproximadamente.

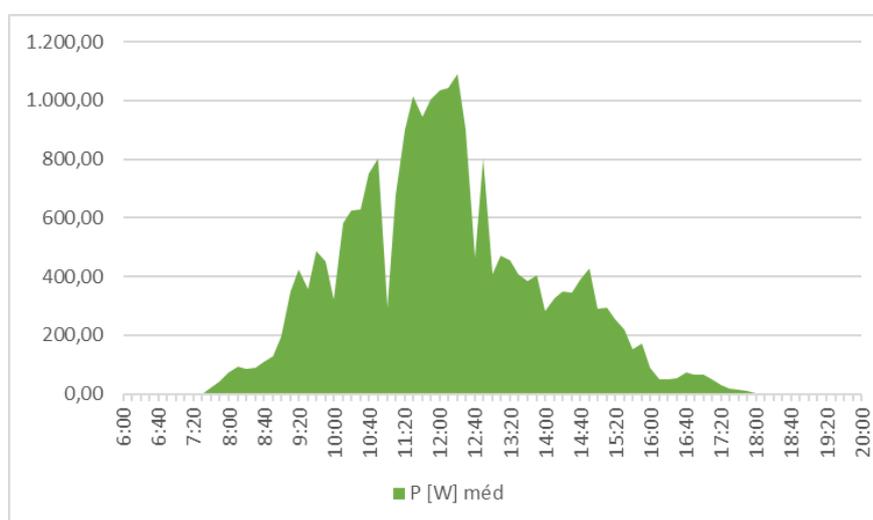


Figura 33 – Potência média em W do inversor do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 27/05/2022.

Fonte: Autora.

A Figura 34 ressalta as taxas de distorção harmônica da corrente em relação ao tempo, durante o dia de 27/05/2022.

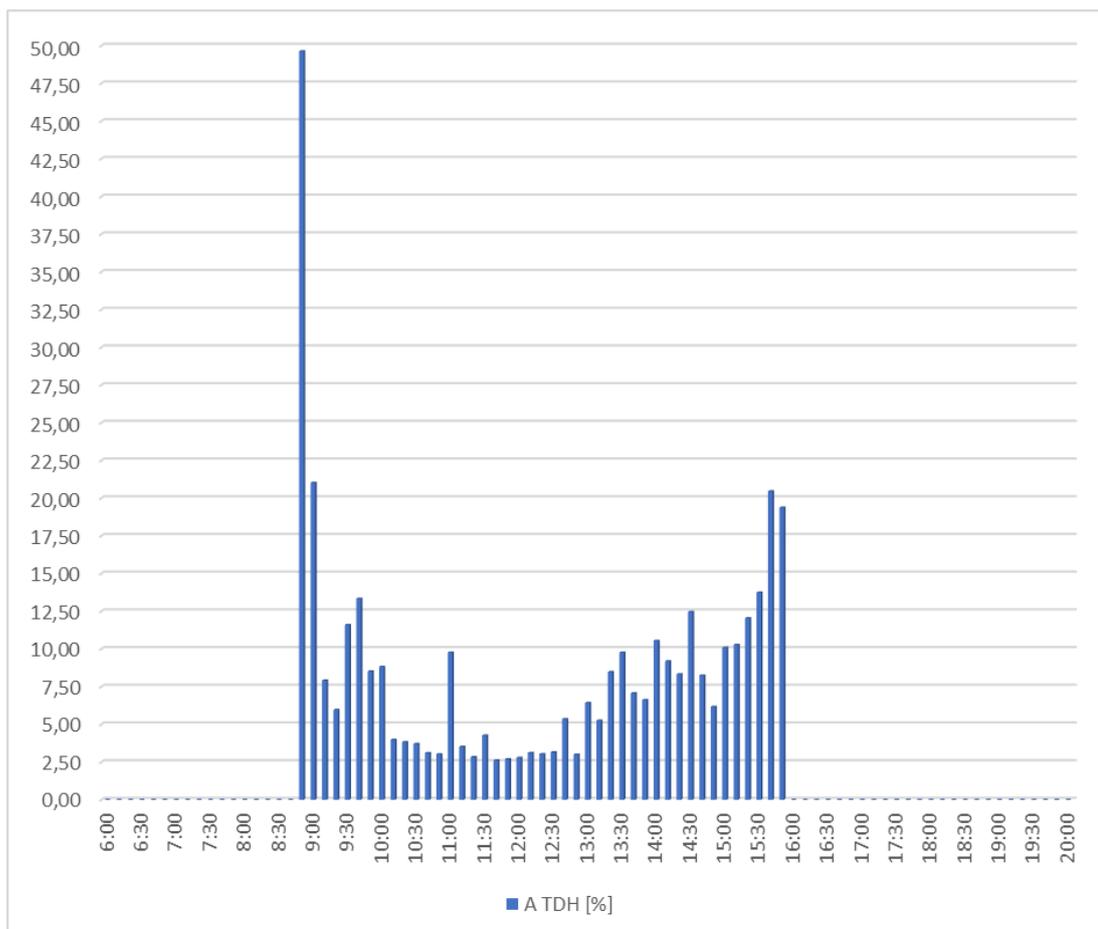


Figura 34 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 27/05/2022.

Fonte: Autora.

Percebe-se que, durante o dia 27/05/2022, os momentos em que as taxas de harmônicas não ultrapassam o limite de 5% coincidem com os valores de maior potência registrados neste período (Figura 34).

Com objetivo de evidenciar o comportamento do inversor no que diz respeito à produção de harmônicas em relação à incidência solar, a Figura 35 mostra a porcentagem da potência do inversor acerca da potência nominal e a taxa de distorção harmônica da corrente no mesmo período.

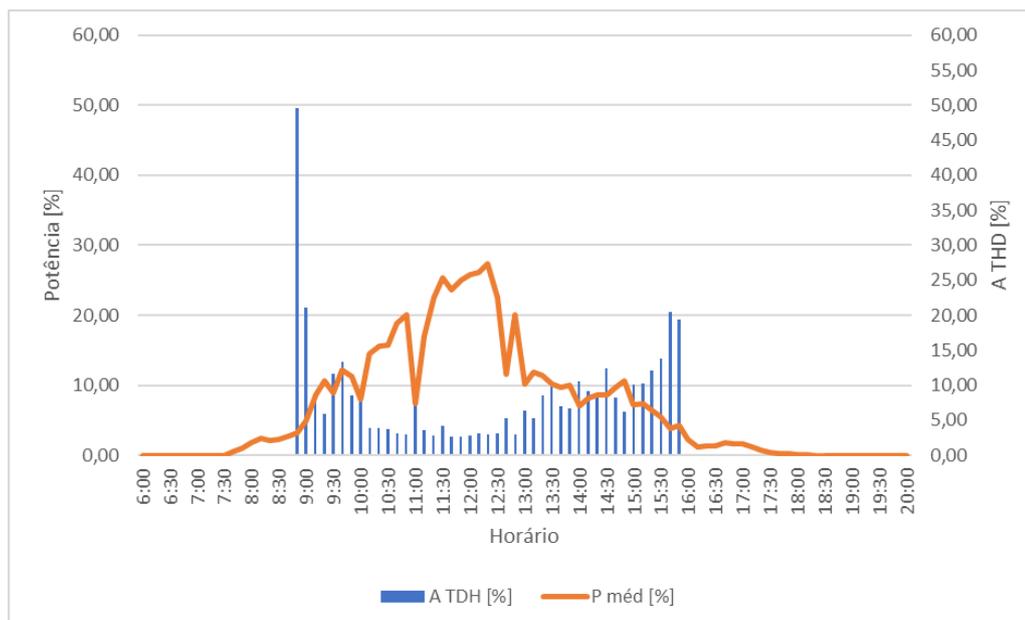


Figura 35 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor e a potência também (em %) do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 27/05/2022.

Fonte: Autora.

Como pode ser verificado na Figura 35, que demonstra a curva em porcentagem da potência do inversor de 4 kW e a produção, também em porcentagem, de harmônicas para o período estabelecido, constata-se que as distorções harmônicas são mais expressivas quando o inversor trabalha abaixo de 20% de sua potência nominal, pois, neste intervalo, em quase todo o momento as taxas de distorções harmônicas ultrapassaram o limiar de 5%.

O segundo momento do período analisado do inversor de 4 kW do sistema 2 corresponde ao dia 31/05/2022. Como no caso anterior, serão mostrados os gráficos da potência média em Watts (Figura 36), distorção harmônica da corrente em porcentagem (Figura 37) e a combinação do carregamento do inversor *versus* a taxa de distorção harmônica da corrente devido ao efeito do sombreamento em porcentagem (Figura 38).

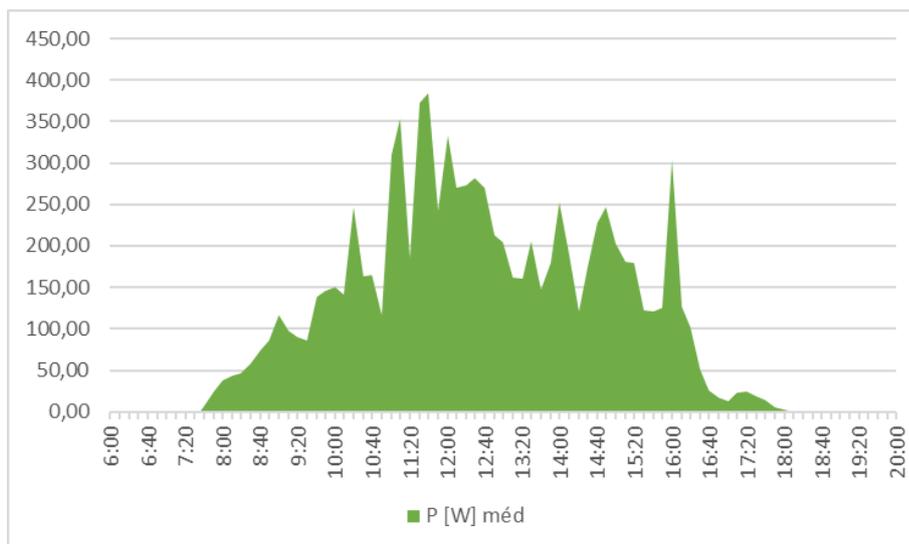


Figura 36 – Potência média em W do inversor do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 31/05/2022.

Fonte: Autora.

De acordo com a Figura 37, o carregamento do inversor foi muito inferior à potência nominal, caracterizando um dia com altos índices de sombreamento.

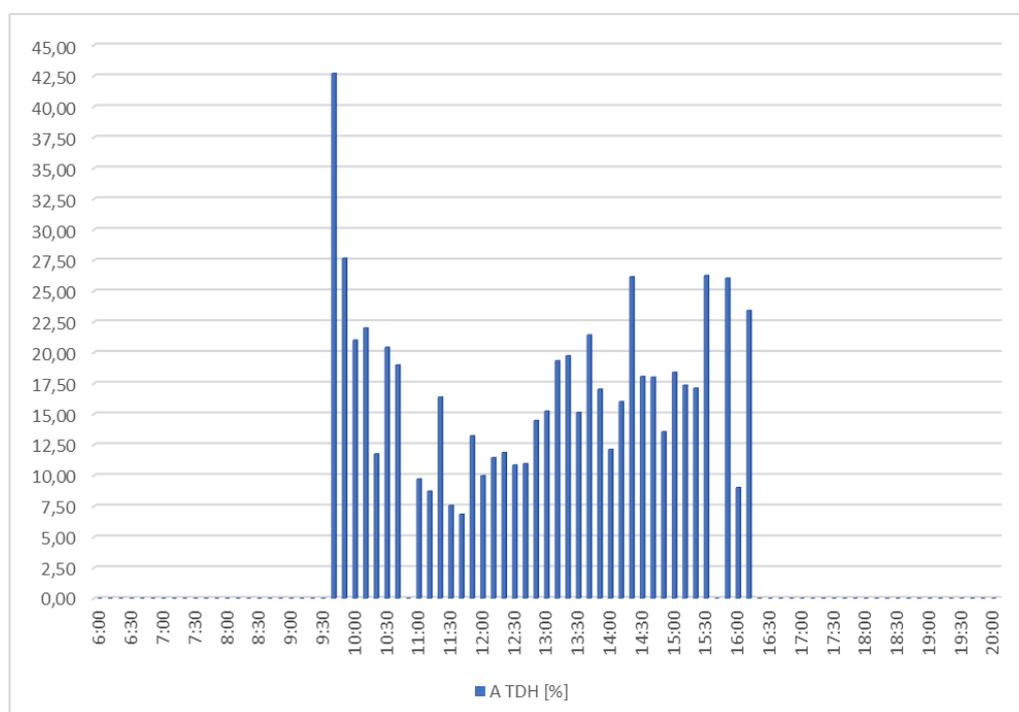


Figura 37 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 27/05/2022.

Fonte: Autora.

A geração fotovoltaica é afetada por mudanças repentinas como, por exemplo, a passagem de nuvens durante o dia. A taxa de distorção harmônica da corrente também é alta, sendo que a emissão harmônica de corrente de um sistema fotovoltaico é fortemente dependente da potência de saída do inversor (FEKETE *et al.*, 2012).

Na Figura 38, percebeu-se que, com exceção de pequeno intervalo sem registro da taxa de distorção harmônica, os demais intervalos tiveram sua maioria acima do limite de 5% previsto em norma.

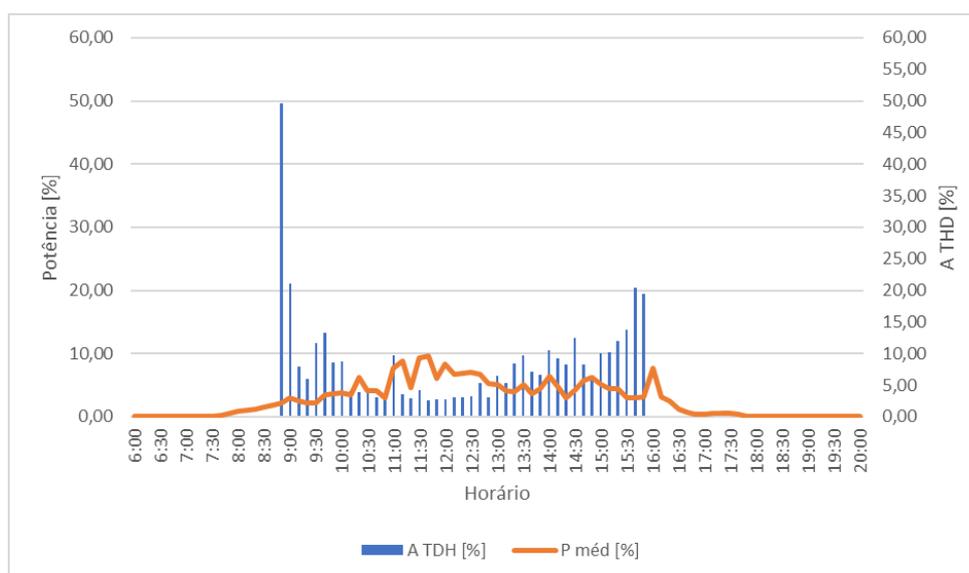


Figura 38 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor e a potência (em %) do sistema 2 de 4 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 31/05/2022.

Fonte: Autora

Na Figura 38, constata-se que as harmônicas de maior valor estão no momento que o inversor tem os menores valores de carregamento, percebe-se também que nesse dia o inversor trabalhou abaixo de 10% do valor nominal.

Da mesma forma que ocorreu com o inversor de 4 kW do sistema 2 do trabalho proposto, o estudo realizado por Leite *et al.* (2018) detectou que em um sistema fotovoltaico com potência nominal instalado de 3,38 kWp composto por um inversor de 3 kW também indicava que, quanto menor a potência de geração mais elevadas eram as harmônicas de correntes, principalmente quando a potência do inversor era inferior a 10%. Nesta situação, as harmônicas ultrapassavam os valores máximos estipulado pela norma brasileira.

A Figura 39 salienta o comportamento do inversor de 4 kW do sistema 2 a respeito dos valores da taxa de distorção harmônica da corrente, bem como das distorções harmônicas individuais.

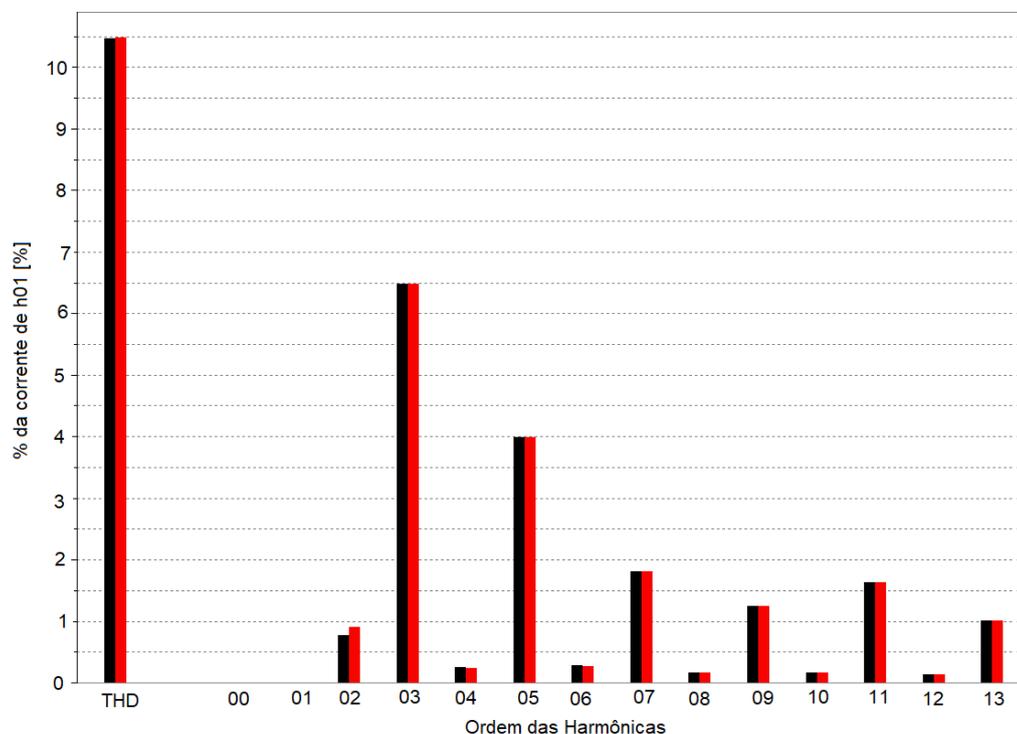


Figura 39 – Histograma da THD da corrente e harmônicas até 13ª ordem (em %) em relação à harmônica fundamental para as fases AN e BN respectivamente do sistema 2 – inversor de 4 kW.

Fonte: Autora

Na Figura 35, é possível entender que a média da distorção harmônica da corrente durante o período estipulado foi o dobro do que preconiza a norma NBR 16.149/2013, ou seja, os valores superaram 10% de TDH da corrente. A harmônica de 3ª ordem também ultrapassou o limite de 4% recomendado pela NBR 16.149/2013.

De acordo com Elkholy (2019), em seus estudos com inversores aplicados em geração fotovoltaica, esse autor também identificou as harmônicas de corrente de 3ª ordem com valores significativos durante o nascer e o pôr do sol.

Além do mais, a presença de harmônicas múltiplo de 3 contribui com o aumento do aquecimento de condutores neutros, como também elevadas harmônicas de 3ª ordem no neutro podem causar sérios danos e até incêndio, visto

que o condutor neutro geralmente não é protegido contra sobrecarga (FEKETE, 2012).

A injeção de correntes distorcidas sempre será indesejável, uma vez que pode impactar em outras cargas ou equipamentos não lineares como, por exemplo, os transformadores, cujas perdas dessa máquina podem ser maiores (SOARES *et al.*, 2021).

4.3 Resultados do Sistema – Usina Olímpio: Inversor de 100 kW

A usina Olímpio é composta por 5 subsistemas, sendo 4 subsistemas de 300 kW, com 3 inversores de 100 kW cada e 1 subsistema de 1 MW composto 10 inversores de 100 kW. Este estudo analisou apenas um inversor de 1 kW, tendo em vista que os 22 inversores eram de mesma potência, mesmo fabricante e mesmo modelo.

A particularidade desse sistema não está só no fato de se tratar de uma minigeração fotovoltaica, mas também de ser uma usina que utiliza rastreamento solar.

O rastreamento solar dessa usina é realizado por meio de um computador ou processador que calcula a posição do sol empregando algoritmos que utilizam data, hora e dados geográficos, projetados por Lewandoski *et al.* (2022).

4.3.1 Tensão, Corrente e Frequência

No período de monitoramento, foram registradas as grandezas seguintes, conforme as Tabelas 35, 36 e 37.

Tabela 35 – Grandezas registradas na fase AN do sistema 3 – inversor de 100 kW

Grandeza	Fase NA		
	Valor	Data	Hora
Tensão Máxima	250,8 V	11/07/2022	22:00
Tensão Mínima	191,4 V	02/07/2022	08:50
Tensão Média		228,10 V	
Corrente Máxima	123,90 A	04/07/2022	14:50
Corrente Mínima	0,30 A	01/07/2022	17:50
Corrente Média		35,8 A	

Fonte: Autora.

Tabela 36 – Grandezas registradas na fase BN do sistema 3 – inversor de 100 kW

Grandeza	Fase BN		
	Valor	Data	Hora
Tensão Máxima	239,6 V	08/07/2022	09:50
Tensão Mínima	173,4 V	11/07/2022	11:10
Tensão Média		226,90 V	
Corrente Máxima	121,80 A	04/07/2022	14:50
Corrente Mínima	0,32 A	10/07/2022	07:20
Corrente Média		35,1 A	

Fonte: Autora.

Tabela 37 – Grandezas registradas na fase CN do sistema 3 – inversor de 100 kW

Grandeza	Fase CN		
	Valor	Data	Hora
Tensão Máxima	248,0 V	02/07/2022	08:50
Tensão Mínima	186,1 V	08/07/2022	09:50
Tensão Média		227,6 V	
Corrente Máxima	122,60 A	04/07/2022	14:50
Corrente Mínima	0,28 A	01/07/2022	17:50
Corrente Média		35,5 A	

Fonte: Autora.

Como analisado nos sistemas 1 e 2, porém nesse sistema a tensão nominal deve estar dentro da faixa ($202 \leq TL \leq 231$), sendo que as tensões das 3 fases registram uma tensão média bem equilibradas, como pode ser observado nas Tabelas 35, 36 e 37. Como nos casos anteriores, existiram alguns momentos que excederam os valores limites. Na Figura 40, é possível observar o comportamento das tensões médias (em Vrms) nas 3 fases do dia 02/07/2022.

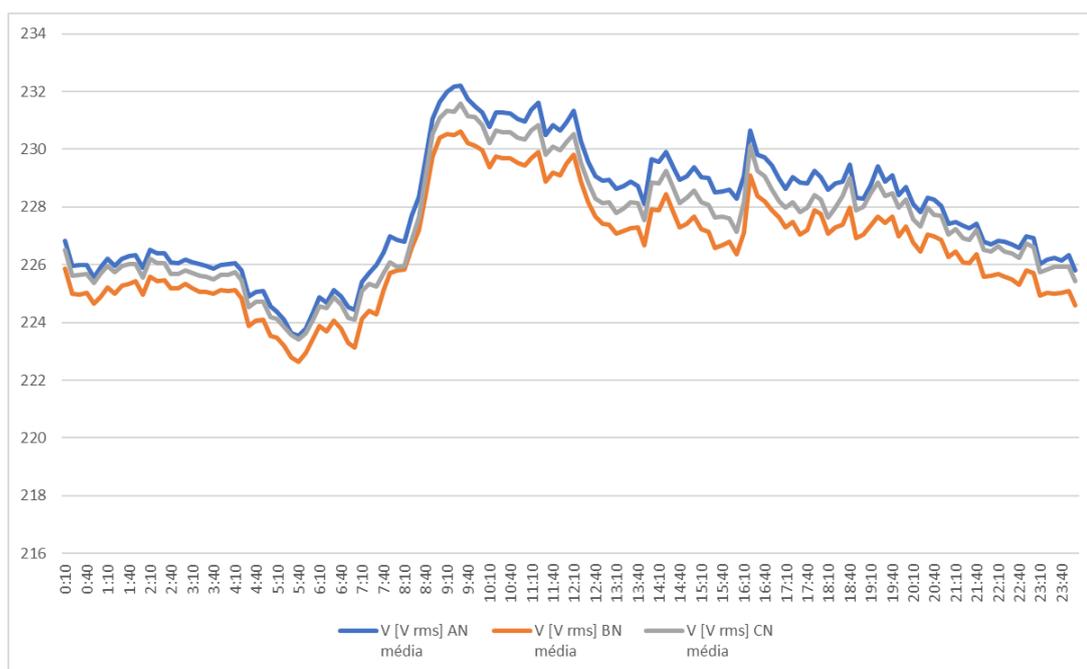


Figura 40 – Tensão média das fases AN, BN e CN em Vrms durante o ciclo de 24 horas registrado no dia 02/07/2022.

Fonte: Autora.

Percebe-se, na Figura 40, que o valor que ultrapassa a faixa de tensão recomendada é de aproximadamente 1 Volts. Geralmente, essa faixa da tensão gerada mais alta ocorre em horário comercial, no momento em que a rede possivelmente está operando próxima do limite inferior da faixa de tensão aceitável. Entendendo que a Usina Olimpo gera energia para o mercado livre, ou seja, a energia gerada vai entrar na rede de distribuição do sistema, esse fato contribui para manter a tensão do sistema dentro de valores desejáveis.

Vale frisar que o sistema 3 chegou a registrar uma corrente máxima de 123,90 A (77,43% da I nominal), valor considerado bom. Uma parte de tais valores elevados pode estar no fato de que os dias em que foram registrados os valores das grandezas elétricas e qualidade de energia desse sistema tenham sido visivelmente caracterizados como dias com baixas temperaturas aliados ao baixo sobreamento

por nuvens. A Tabela 38 traz os valores de frequência do sistema 3 – inversor de 100 kW.

Tabela 38 – Frequências registradas no sistema 3 – inversor de 100 kW

Grandeza	Valor	Data	Hora
Frequência Máx.	60,16 Hz	10/07/2022	08:00
Frequência Média Linear	60 Hz		
Frequência Mín.	59,83 Hz	05/07/2022	16:30

Como nos demais sistemas, o sistema 3 também registrou valores meramente fora desta faixa, porém manteve frequência média linear de 60Hz. Para corroborar com essa informação, a Figura 41 ressalta o registro da frequência do sistema 3 – inversor de 100 kW durante todo o período estudado.

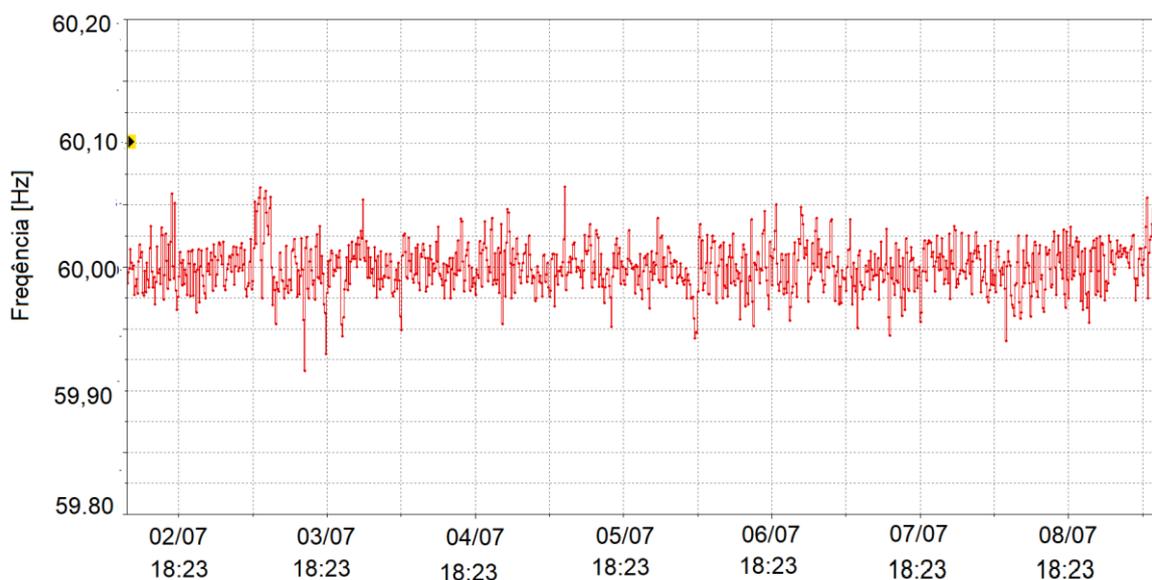


Figura 41 – Frequência Média em Hz do inversor do sistema 3 registrada entre o dia 02/07/2022 e 08/07/2022.

Fonte: Autora.

4.3.2 Distorção harmônica total e harmônicas da tensão

Sobre a qualidade de energia da tensão, os limites máximo, mínimo e a média linear das distorções de harmônicas totais para as fases AN, BN e CN respectivamente podem ser constatados nas Tabelas 39 e 41.

Tabela 39 – TDH da tensão na fase AN do sistema 3 – inversor de 100 kW

Grandeza	Fase NA		
	Valor	Data	Hora
V TDH Máx.	9,3 %	01/07/2022	17:50
V TDH Média Linear	1,2%	-	-
V TDH Mín.	0,79 %	02/07/2022	16:10

Fonte: Autora.

Tabela 40 – TDH da tensão na fase BN do sistema 3 – inversor de 100 kW

Grandeza	Fase BN		
	Valor	Data	Hora
V TDH Máx.	8,9 %	01/07/2022	17:50
V TDH Média Linear	1,1 %	-	-
V TDH Mín.	0,68 %	11/07/2022	13:10

Fonte: Autora.

Tabela 41 – TDH da tensão na fase CN do sistema 3 – inversor de 100 kW

Grandeza	Fase CN		
	Valor	Data	Hora
V TDH Máx.	9,8 %	01/07/2022	17:50
V TDH Média Linear	1,3 %	-	-
V TDH Mín.	0,71 %	03/07/2022	15:00

Fonte: Autora.

Da mesma forma que ocorre nos demais sistemas, as informações do inversor de 100 kW do sistema 3 coletadas do dia 1º de julho 2022 ao dia 12 de julho de 2022 não registraram distorções harmônicas totais da tensão (THD V) acima do que é estabelecido pela PRODIST - Módulo 8 da ANEEL (2021), que corresponde a 10,0%, em quaisquer uma de suas fases.

A Figura 42 mostra todas as fases nas quais as distorções harmônicas ímpares têm os maiores percentuais se comparadas com as harmônicas pares. Vale destacar também que o inversor não apresentou a presença da componente cc.

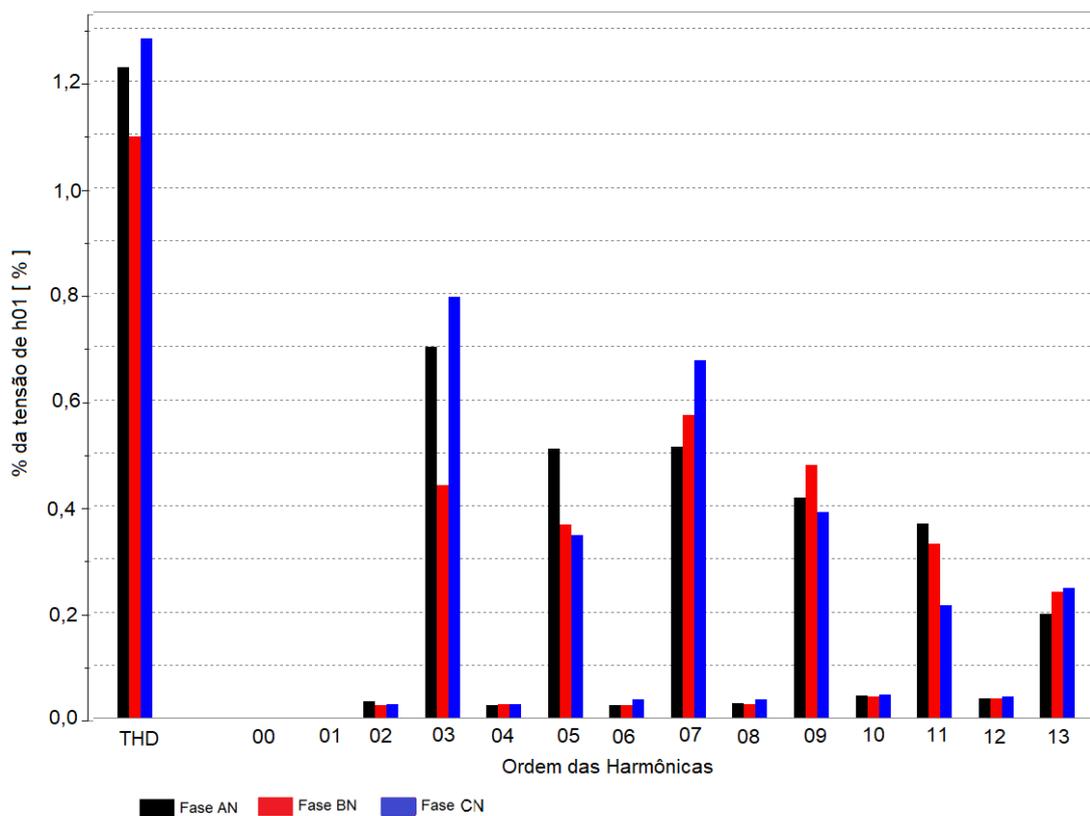


Figura 42 – Histograma da THD da tensão e harmônicas até 13ª ordem (em %) em relação à harmônica fundamental para as fases AN, BN e CN respectivamente do sistema 3 – inversor de 100 kW.

Fonte: Autora.

4.2.2.2 Distorção harmônica da Corrente e Potência Ativa

A Tabela 42 exibe os valores médios da taxa de distorção harmônica da corrente nas fases A, B e C, bem como os momentos de máxima e mínima distorção.

Tabela 42 – TDH da corrente nas fases A, B e C do sistema 3 – inversor de 100 kW

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
	160,7%	200,4%	171,5%
A TDH Máx.	08/07/2022	12/07/2022	01/07/2022
	07:20	07:50	18:10
A TDH Média Linear	3,9%	4,2%	4,3%
A TDH Mín.	0,34%	0,36%	0,45%

Fonte: Autora.

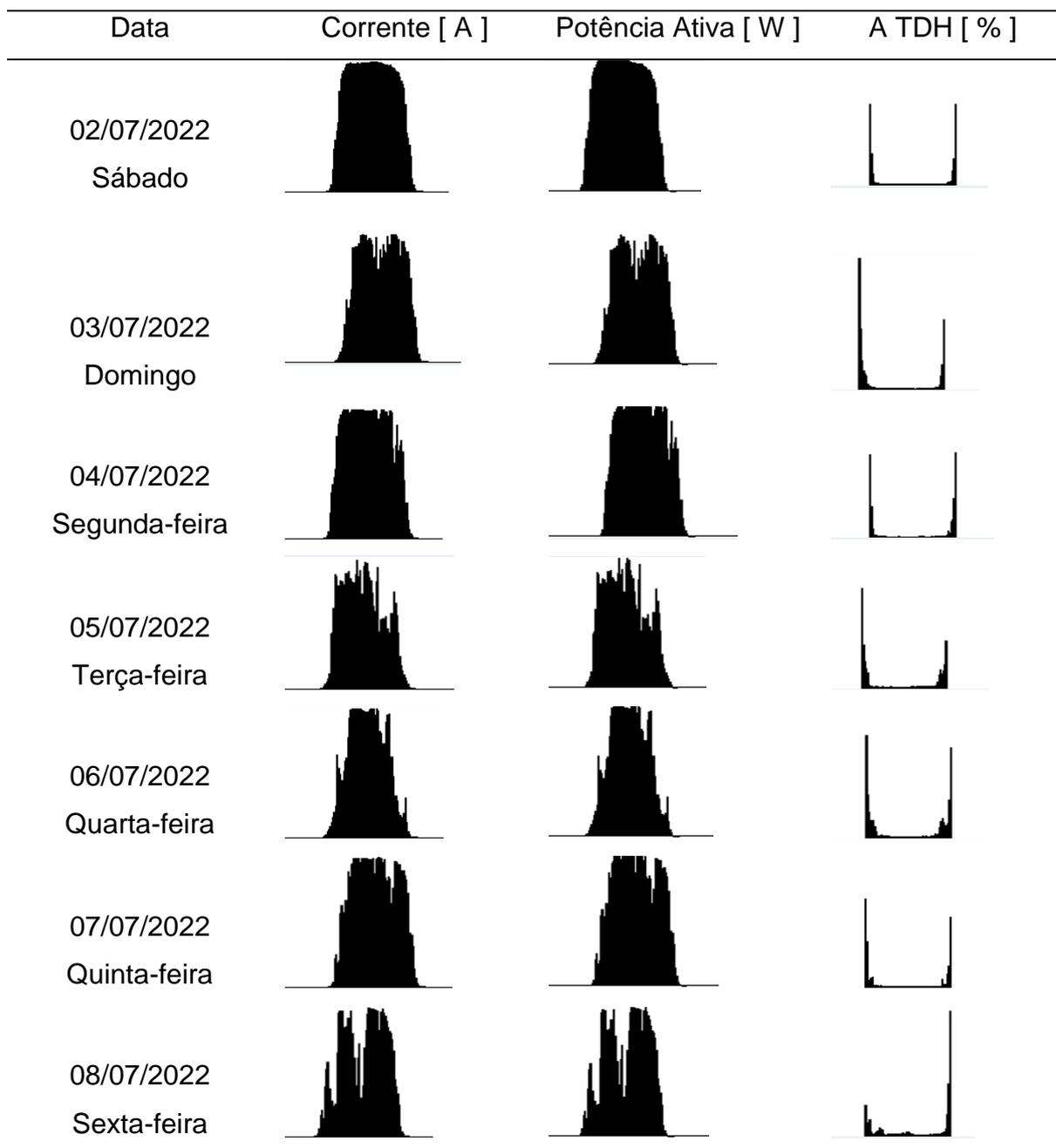
O sistema 3 – inversor de 100 kW, da mesma forma que o sistema I – 7,5 kW, não ultrapassou o limite de 5% no que diz respeito à taxa de distorção harmônica da corrente.

Na Tabela 43, é mostrado o comportamento da corrente, da potência ativa e da taxa de distorção harmônica da corrente do inversor do 100 kW do sistema 3.

O ponto de destaque neste sistema está no comportamento das harmônicas, pois, por se tratar de um sistema com rastreador solar, os módulos solares tendem a acompanhar o movimento do sol, aproveitando melhor a incidência solar diária. Com isso, ocorreram obviamente menos intervalos com baixo carregamento do inversor e períodos relativamente curtos de injeção e harmônicas acima do permitido.

O período estudado no sistema 3 teve o clima com predominância de baixíssimo sombreamento, como pode ser observado em todas as curvas da corrente e da potência na Tabela 44. Em razão disso, optou-se por escolher apenas um momento para a análise da potência e das harmônicas.

Tabela 43 – Comportamento da corrente, potência ativa e TDH da corrente diária do sistema 3 – inversor de 100 kW



Fonte: Autora.

As Figuras 43 e 44 mostram os valores da potência ativa e da taxa de distorção harmônica da corrente durante o intervalo das 06:00h às 20:00h do dia 08/07/2022.

A Figura 43 demonstra que a potência do sistema 3 – inversor de 100 kW alcançou valores mais elevados em horários anteriores e posteriores aos do sistema 1- inversor de 7,5 kW e sistema 2 – inversor 4 kW.

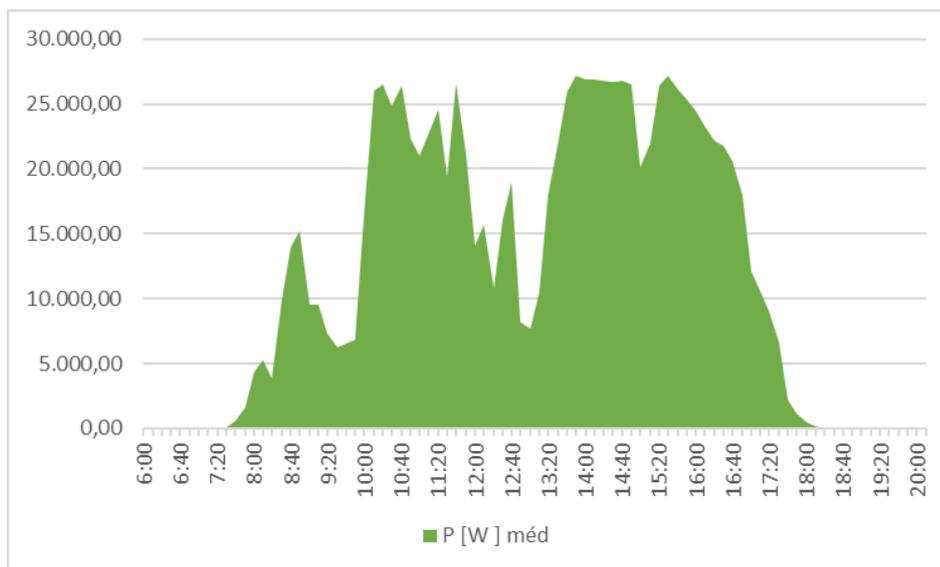


Figura 43 – Potência média em W do inversor do sistema 3 de 100 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 08/07/2022.

Fonte: Autora.

As taxas de distorção harmônica da corrente em relação ao tempo, durante o dia de 08/07/2022, são mostradas na Figura 44.

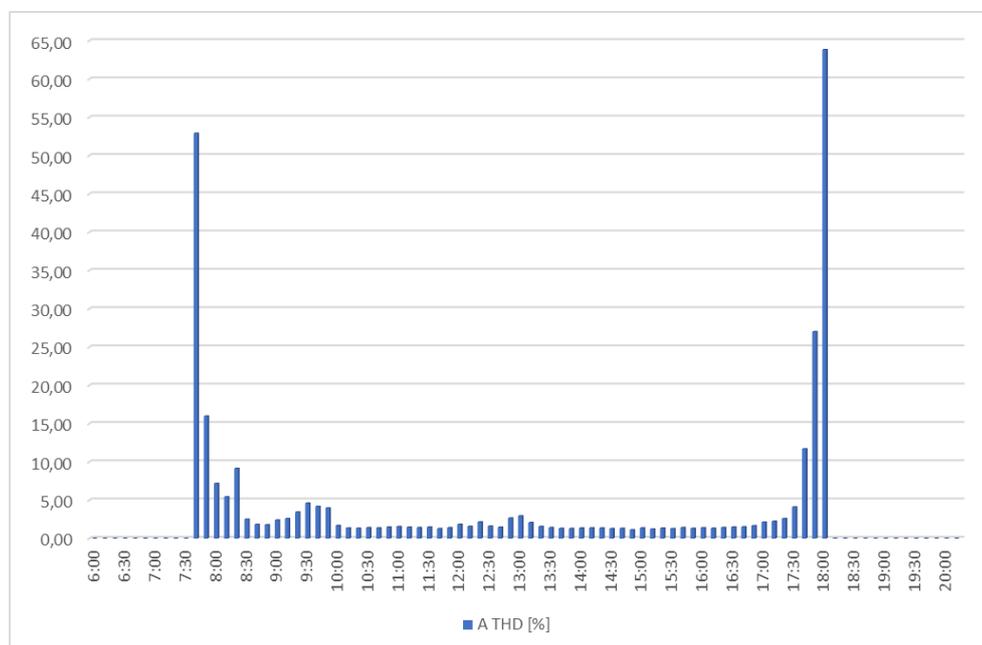


Figura 44 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor do sistema 3 de 100 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 08/07/2022.

Fonte: Autora.

O comportamento das taxas de distorção harmônica no sistema 3 – inversor de 100 kW com rastreamento solar ficou abaixo do valor limite de 5% em quase todos os momentos, ou seja, no dia 08/07/2022 as taxas de distorções harmônicas foram apropriadas no intervalo compreendido entre 08:30h e 17:30h.

Bogila *et al.* (2018) também constataram em seu estudo de um sistema fotovoltaico com rastreador solar composto por um inversor de 12,5 kW em que as taxas de distorções harmônicas eram inferiores aos sistemas fotovoltaicos compostos por inversores de 20 kW, 17,5 kW e 15 kW.

Fekete *et al.* (2012) observaram que, quando a corrente é alta, as distorções harmônicas são menores, tanto no verão quanto no inverno. Também esclareceram que, no período de baixa geração, a produção de corrente é pequena, porém muito distorcida, algo bastante característico no efeito de sombreamento que acontece no nascer e pôr do sol.

Como o inversor de 100 kW pertence a um sistema com rastreamento solar, é possível verificar na Figura 42 que esse efeito de sombreamento é muito pequeno, pois, nesse sistema, são poucos os momentos em que o arranjo fotovoltaico não é atingido por irradiação solar direta.

A Figura 45 mostra a porcentagem da potência do inversor em relação à potência nominal e a taxa de distorção harmônica da corrente, em porcentagem, no mesmo período.

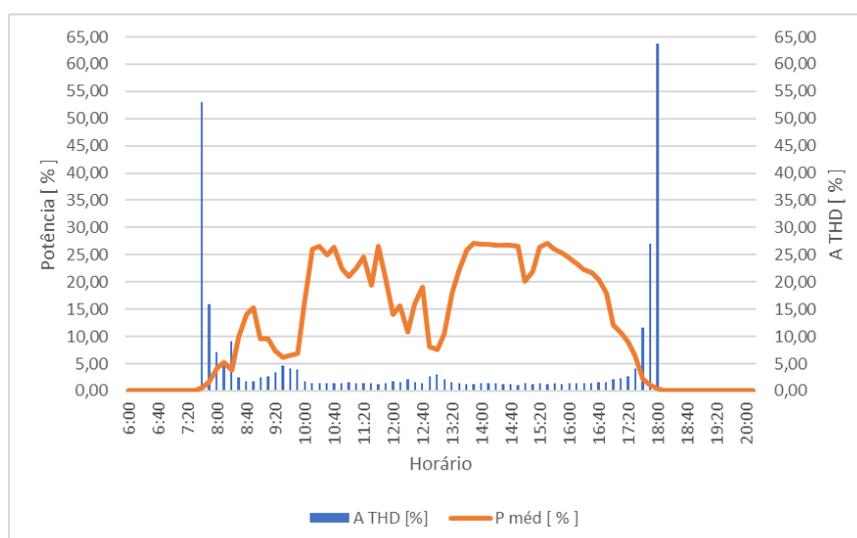


Figura 45 – Taxa de distorção harmônica da corrente (em %) do inversor e a potência (em %) do sistema 3 de 100 kW registrada no intervalo das 06:00h às 20:00h no dia 08/07/2022.

Fonte: Autora.

Apesar de existir taxas de distorções harmônicas expressivas no sistema 3 – inversor de 100 kW, as avarias do sinal acontecem em momentos muito curtos no começo da manhã e no final da tarde. Pode-se também perceber que o carregamento do inversor se inicia horários antes e acaba em horários posteriores aos dos inversores dos sistemas fotovoltaico fixos.

Para finalizar, a Figura 46 apresenta o comportamento do inversor de 100 kW do sistema 3 a respeito dos valores da taxa de distorção harmônica da corrente, bem como das distorções harmônicas individuais.

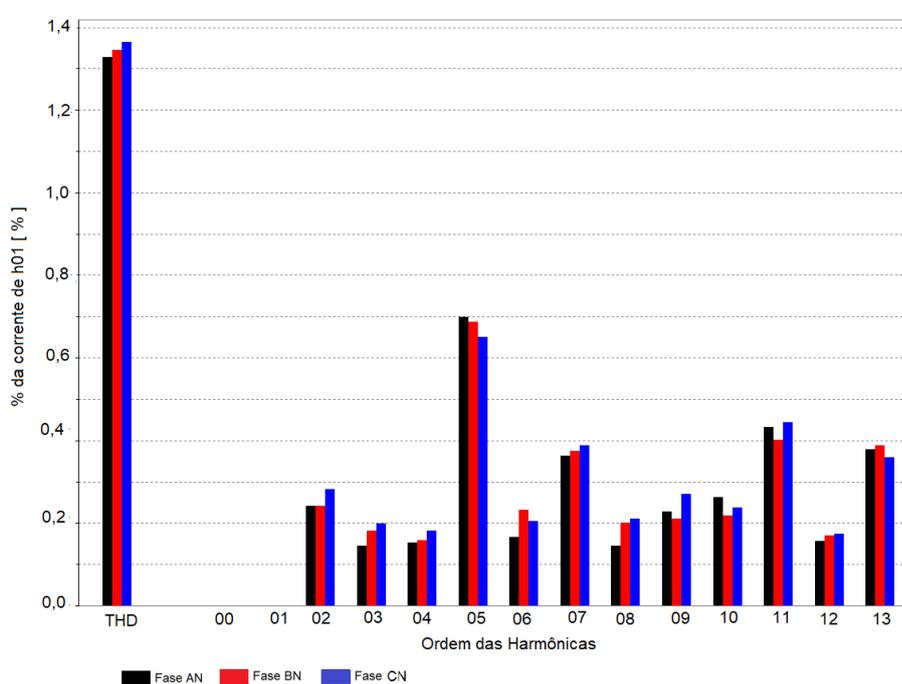


Figura 46 – Histograma da THD da corrente e harmônicas até 13ª ordem (em %) em relação à harmônica fundamental para as fases NA, BN e CN respectivamente do sistema 3 – inversor de 100 kW.

Fonte: Autora.

Na Figura 46, é possível entender que as harmônicas foram baixas, muito próximas dos valores das harmônicas pares que, nestes casos, são caracterizadas por valores pequenos, mesmo no caso da harmônica de 5ª ordem, que é a mais expressiva, registrou valores satisfatórios.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a qualidade de energia no que se refere aos níveis de tensão, frequência industrial e, principalmente, as distorções harmônicas dos inversores de sistema fotovoltaico fixos de 4 kW e 7,5 kW e inversor de sistema fotovoltaico com rastreamento solar de 100 kW.

A frequência dos sistemas avaliados praticamente se manteve dentro dos valores recomendados, havendo ultrapassagem mínima desse valor. No que diz respeito ao nível de tensão, todos os sistemas mantiveram a tensão média dentro da norma, porém os sistemas fixos 1 (inversor de 7,5 kW) e 2 (inversor de 4 kW) registraram ocasiões com tensão mínima abaixo do que preconiza a norma, e o sistema móvel 3 (inversor de 100 kW) registrou momento com tensão superior ao recomendado. Entretanto, no caso do sistema 3, os horários que geraram tensão acima do estabelecido, em muitos casos, coincidiam com horários que o sistema de distribuição possui valores mais baixos de tensão por se tratar de horários de alto consumo energético.

Sobre as distorções harmônicas de tensão, todos os 3 sistemas ficaram muito abaixo do valor máximo recomendado por norma. Entretanto, no que diz respeito às distorções harmônicas de corrente, a maioria dos resultados apresentou taxas elevadas acima do permitido ao nascer e pôr do sol, sendo o sistema 3 – inversor de 100 kW. Por se tratar de um sistema com rastreador solar, obteve o melhor comportamento, pois o sistema operava injetando distorções harmônicas superiores a 5% durante apenas uma hora ou menos nos períodos mais críticos. O sistema com rastreamento solar, além de aumentar a eficiência do sistema, ainda produz menores quantidades de taxa de distorção harmônicas acima do valor previsto em norma.

Com as distorções harmônicas da corrente dos dois sistemas fixos, o inversor de 7,5 kW teve comportamento satisfatório, pois também apresentou momentos curtos de uma hora ou menos por dia, quando a distorção harmônica ultrapassou 5%. Por sua vez, o sistema que contém o inversor de 4 kW foi o que obteve os piores resultados, uma vez que registrou distorções harmônicas da corrente superior a 5% em intervalos de tempos muito superior ao inversor de 7,5 kW.

Ao comparar o sistema com o rastreador solar e os sistemas fixos, percebe-se que o sistema com rastreador gerou energia e distorções harmônicas altas em horários mais cedo e mais tarde do que o sistema fixo, porém tais distorções harmônicas foram injetadas no sistema em intervalos de tempo mais curtos.

Entre os três sistemas avaliados, dois deles tiveram a corrente fotovoltaica fortemente distorcida durante um pequeno intervalo de geração reduzida. Seus impactos, em alguns momentos, podem ser considerados pequenos ou insignificantes, pois não afetam o sistema de distribuição de energia, porém esta visão, futuramente, deve ser reavaliada diante do crescimento de unidades de geração distribuída por meio de um sistema fotovoltaico que injeta energia na rede de distribuição.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A relevância da energia elétrica para a sociedade moderna é indiscutível, uma vez que se trata de um insumo que promove o desenvolvimento econômico. A modernização e descobrimentos de várias fontes energéticas influenciaram nas atividades industriais, comerciais e residências, já que os avanços tecnológicos são fundamentais para automação dos produtos e serviços, além de impactar na tecnologia da informação, nos computadores e influenciar diretamente em outros setores de infraestrutura tais como transporte, telecomunicações e saneamento.

Na atualidade, a preocupação energética vai além do seu suprimento contínuo, pois os debates são inadiáveis: a energia como modelo sustentável e a qualidade da energia elétrica.

Este trabalho analisou três fontes renováveis de geração de energia, a fim de contribuir com informações sobre qualidade da energia elétricas da geração fotovoltaica, pois não basta garantir o suprimento da energia, mas também ofertá-la com qualidade.

Com a relevância da energia solar, é perceptível o rápido crescimento da capacidade instalada fotovoltaica nos últimos tempos e se esta fonte oferta energia sem monitoração. É possível que algumas unidades produzam má qualidade de energia que pode causar prejuízos mensuráveis e imensuráveis.

Por se tratar de uma fonte sustentável, que pode ser ofertada de forma distribuída e em vários níveis de potência, desde um modelo simplificado para suprir apenas uma unidade residencial até usinas de grande porte é essencial que se atente para a qualidade com que a energia elétrica é gerada, já que a monitoração da QEE não é realizada pelo órgão regulamentador.

Uma saída para manter os níveis de qualidade de energia elétrica aceitáveis seria o monitoramento da qualidade de fabricação dos inversores da indústria da energia solar.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa no 235, de 14 de novembro de 2006**. Brasil, 2006. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>. Acessado em: 08/07/2021.

_____. **Geração Distribuída**. 2018. Brasil, 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acessado em: 08/07/2021.

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/prodist>. Acessado em 19/07/2021.

_____. **Relação de Empreendimentos de Geração Distribuída**. Brasil, 2022. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida>. Acessado em: 14/10/2022.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos com Aplicações**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013.

ARRUDA, E. F. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada *Wavelet***. 2003. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - ABGD. **Geração Distribuída. Conceitos e caminhos para o desenvolvimento sustentável**. E-book Políticas públicas em geração distribuída de energia. 2021, 24p. São Paulo Publicado em 24 de abril de 2021. Disponível em: <https://www.abgd.com.br/portal/e-book/>. Acesso em: 15/06/2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16.149/2013: sistemas fotovoltaicos (FV): características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição**. Rio de Janeiro. 2013.

BELISKI, L. M.; SCARABELOT, L. T.; RAMPINELLI, G. A. **Análise da qualidade de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída em unidades prosumidoras residenciais**. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2018, 10p. Gramado, 2018.

BRAGION, N.; SANTOS, A. C. **Variáveis que sustentam o período atual de produção de bioetanol**. Revista de Administração e Inovação, São Paulo, v. 9, n. 1, p.126-140, jan./mar. 2012.

BRASIL, 2004. **Decreto n.º 5.163, de 30 de julho de 2004**. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm. Acesso em 15/02/2021

BRASIL, 2004. **Decreto n.º 5.163, de 30 de julho de 2004**. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm. Acesso em 15/02/2021

BRASIL, 2013. ABNT NBR 16.149:2013. **Sistemas fotovoltaicos (FV) – características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição**.

BUENO, J. PIRES, A. **Políticas Energéticas para o Brasil: Proposta para o Crescimento Sustentável**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2006.

BOGILA, A. *et al.* **Análise Harmônica dos inversores fotovoltaicos de uma microgeração fotovoltaica**. 2018. 10p. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado. 2018.

CAPELLI, Alexandre. **Energia elétrica: qualidade e eficiência para aplicações industriais**. São Paulo: Editora Saraiva. 2013.

CARVALHO, K. J. S. **Sistemas fotovoltaicos distribuídos e integrados à rede elétrica: condições de operação e seus impactos**. 2012. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

CASTRO, F. C. **Distorção harmônica de corrente produzida por inversores fotovoltaicos conectados à rede**. 2019. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2019.

CEZÁRIO, I. C. **Estudo experimental e modelagem numérica de campos eletromagnéticos de uma fonte chaveada de baixa potência**. 2012. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

CORREIA, E. L. **A retomada do uso de álcool combustível no Brasil**. 2007, 8p TD. Mestrado em economia aplicada FEA/UFUJF 012/2007. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2007. Disponível em: https://www2.ufjf.br/poseconomia//files/2010/01/td_012_2007.pdf. Acesso em: 02/02/2021.

DANTAS, O. L; APOLONIO, R. **Qualidade de energia elétrica de um sistema fotovoltaico de 45 kWp conectado à rede**. *ES Engineering and Science*. V. 4, ed. 7, p 49-62. 2018

DECKMANN. S. M.; POMILIO J. A. **Avaliação da qualidade da energia elétrica. texto para apontamentos dos cursos de pós-graduação em engenharia elétrica na faculdade de engenharia elétrica e de computação da Universidade Estadual de Campinas**. (17/02/2020). Disponível em: <https://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it012>. Acesso em: 25/03/2021

ELKHOLY, A. **Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems**.

International Solar Energy Society. Solar energy. Elsevier, v. 183, p. 315-326, may, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário Estatístico de energia 2011**. 244p, Rio de Janeiro, 2011.

_____. **Anuário Estatístico de energia 2016 ano base 2015**. 232p, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Anuário Estatístico de energia 2021 ano base 2020**. 255p, Rio de Janeiro, 2021.

_____. **BEN 2022 Relatório Síntese**. Ano base 2021. 37p, Rio de Janeiro, 2022.

FARIAS, L. M.; SELLITO. M. A. **Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras**. Revista Liberato. Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 2011.

FEKETE, K. *et al.* **Expansion of the residential photovoltaic systems and its harmonic impact on the distribution grid**. Renewable Energy. Elsevier, v. 43, jul, p. 140-148. 2012.

FERRÃO. A. M. A; NOGUEIRA. D. M. A. Nogueira. **A implantação da eletricidade no Brasil, o patrimônio e o legado das primeiras centrais hidrelétricas**. 1 ed. In: Isaura Cecilia García López. Humberto Morales Moreno (Coord). *Miradas Antropologia, históricas, arquitectónicas y museográficas del patrimonio y cultura de México y América Latina. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Facultad de Filosofía y Letras. Puebla. México*, p. 127-154, 2017.

FERREIRA, A., *et al.* **Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 2018, p. 181-191. 2018.

FERREIRA, M. C.; AMARAL, M. V. F. **Minimização do terceiro harmônico através da ligação em delta em transformadores trifásicos ao atingir a saturação ferromagnética**. 2012, E-xacta, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 45-60, 2012.

FIUZA, E. L. **Identificação de fatores associados à geração distribuída que afetam os custos e benefícios de uma empresa de distribuição de energia elétrica**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.8, n.6, p. 47761-47779, jun.,2022

FORTES, R. R. A. **Distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída fotovoltaica em condição de ressonância paralela**. 2016. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira. 2016.

_____. **Propagação de harmônicas produzidas por inversores fotovoltaicos e transformadores assimetricamente magnetizados na geração distribuída**. 2018.

230p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira. 2018.

FGV - FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS - NÚCLEO DE PROSPECÇÃO E INTELIGÊNCIA INTERNACIONAL NPII. **Análise da matriz energética e da promoção da energia renovável no setor elétrico brasileiro**. 2016, 100p, Rio de Janeiro, nov. 2016.

GASPARIN, F. B. *et al.* **A Influência de Políticas Públicas para o Progresso da Geração Solar Fotovoltaica e Diversificação da Matriz Energética Brasileira**. Revista Virtual de Química (II ConER - Congresso de Energias Renováveis), v.14, n. 4, p. 77-81, 2022.

GASH, R.; TWELE. J. **Wind Power Plants. Fundamentals, Design, Construction and Operation**. 2. ed. Berlim: Springer. 2012, 548p.

GOBBO, E. R.; SILVA, M. A. T. F.; BONE, R. B. **Do petróleo à energia fotovoltaica: a inserção do Brasil neste novo mercado**. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2018, 11p. Gramado, 2018.

GONÇALVES, A. R. *et al.* **Cenários de expansão da geração solar e eólica na matriz elétrica brasileira**. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2018, 10p. Gramado, 2018.

GREENER. **Estudo Estratégico Geração Distribuída. Mercado Fotovoltaico**. 2º Semestre – 2020 São Paulo. 2021. 119p. 2021.

HARMÔNICO. Michaelis Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa, 12 jul. 2021. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=harm%C3%B4nico>. Acessado em: 12/07/2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Statistics report. Key world energy statistics 2021**. Paris, [2021] Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>. Acessado em: 25/07/2022.

JAMAL, A. *et al.* **Power quality evaluation for electrical installation of hospital Building**. (IJACSA) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2019. West Yorkshire, United Kingdom, V. 10, n. 12, p. 380 – 388, 2019.

KAGAN, N. **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

KEMMERICH, P. C. *et al.* **Evolução da normatização para a conexão à rede elétrica de sistemas fotovoltaicos no mundo: uma revisão**. 2020. 11p. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza. 2020.

LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R.; ANTUNES, F. **Harmônicos em Sistema Elétricos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Ed Elsevier. 2014.

LEITE, A. D. **Considerações sobre energia elétrica no Brasil**. TDSE. GESEL Grupo de Estudos do Setor Elétrico. UFRJ. Textos de Discussão do Setor Elétrico n. 30. Rio de Janeiro, 30p, fev. 2011.

LEITE, M.C.C. et al. **Harmonic analysis of a photovoltaic systems connected to low voltage grid**. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, v 16, n 1, jan, p. 112-117. 2018.

LEWANDOSKI, C. F. et al. **Study of the Efficiency of the Solar Tracker System compared to the Fixed Solar Generation System**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 6, abr, p. 1-12. 2022.

MARTINEZ, M. P. L.; ISATA, T. **Proposta de estudo das harmônicas no sistema industrial Sonangol – Namibe a partir de seu levantamento elétrico**. 2018. Revista de *Ingeniería Energética*. Cuba, v. 39, n. 2, mayo/agosto, p. 123-133. 2018.

MARTINHO, E. **Distúrbios da energia elétrica. qualidade de energia, conceito, cuidados, soluções, normalização**. 3 ed. rev. São Paulo: Editora Érica, 2013.

MELO FILHO, J. B.; AZEVEDO, J. G. **Qualidade da energia na geração fotovoltaica através de inversores de diferentes tipos e fabricantes conectados à rede elétrica**. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2018, 10p. Gramado, 2018.

MORIMOTO, C. E. **Definição de CRT**. Hardware.com.br. (2004). Disponível em: <https://www.hardware.com.br/termos/crt/>. Acesso em: 15 de abril de 2022.

PAUL, S. et al. **Review on the development scenario of renewable energy in different country**. In: CONFERENCE 2021 INNOVATIONS IN ENERGY MANAGEMENT AND RENEWABLE RESOURCES (IEMRE). 2021, 2p. Kolkata, Índia. 2021.

PENEDO, V. J. M. **Análise da qualidade de energia elétrica e dos consumos energéticos de uma indústria têxtil**. 2019. 170p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores). Universidade do Minho. Braga, Portugal. 2019.

PEREIRA, N. X. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada**. 2019. 86p. Dissertação (Mestrado em ciências ambientais) da Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Sorocaba, 2019.

PÉRES, L. F. et al. **Analisis comparativo del rendimiento de los módulos fotovoltaicos monocristalino y policristalino bajo condiciones climáticas de Fusagasugá**. *Revista Ingeniería*. *Côlombia*, v. 24, n. 1, p. 48-63, jan. 2019.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A - PETROBRAS. **10 Respostas para suas dúvidas sobre o preço da gasolina.** [2015?]. Disponível: <https://duvidasgasolina.hotsitespetrobras.com.br/>. Acesso em: 10 jan 2021.

PINHO, J. T. GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaico. grupo de trabalho de energia solar.** GTES – CEPEL – DTE – CRESESB. 2014, 530p. Rio de Janeiro. 2014

PINTO, A.C; SILVA FILHO, T. G.; MACHADO, E. P. **Evaluation of photovoltaic microgeneration systems connected to utility: cases studies in Petrolina.** IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, v. 18, n. 9, september 2020.

QAZI, A. *et al.* **Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions.** IEEE ACCESS. New York, v. 7, p. 63837-63851, 2019.

RAMPINELLI, G. A.; DIAS, J. B.; KRENZINGER, A. **Ensaio de inversores para conexão à rede: Fator de potência e distorção harmônica.** In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E III CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA DA ISES, 2008, 10p. Florianópolis, nov. 2008.

REIS, L. B.; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO. C. E. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável.** 2. ed. Barueri: Manole. 2012.

REIS, L. B.; SANTOS; Eldis C. **Energia elétrica e sustentabilidade: aspecto tecnológico, sociais e legais.** 2. ed. Barueri: Manolo, 2014.

RIBEIRO, T. L. *et al.* **Qualidade de energia: estudo comparativo da qualidade da energia elétrica e suas tendências reais.** EUROPEAN ACADEMIC RESEARCH. V. VIII, p 5572 a 5585. December 2020.

RODRIGUES, Y. V. C.; FRIGO, M. M. **Harmônicos em instalações elétricas: teoria, indicadores e normalização.** 2017, p 49-54. SIMPÓSIO DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA DO TOCANTINS – PALMAS/TO, 2017.

SANT'ANA, P. L. **Abordagem teórica sobre junções e dispositivos semicondutores e sua utilização em painéis fotovoltaicos.** 2020, p. 192-203. Rev. Bras. Apl. Vac., Campinas, V. 39, n. 2, maio – ago, 2020.

SANTIAGO, G. L. S; GUERRA, F. K. O. M. V; VALE, M. R. B. G. **Microgeração solar fotovoltaica conectada à rede: análise da qualidade da energia.** In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2018, 10p. Gramado, 2018.

SANTIAGO. J. V. A. **O mercado emergente de energia solar fotovoltaica no Brasil entre 2012 e 2018: avanços, desafios e perspectivas.** 2019. 138p. Dissertação (Mestrado) - Curso Administração de Organizações da Faculdade de Economia. Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto. 2019.

SANTILIO, F. P. **[Aula 19] Distorções Harmônicas - Prodíst Módulo 8. Disciplina de Medidas Elétricas e Instrumentação.** 2022. Canal Fabricio Parra. 07 de

fevereiro de 2022. Disponível:
<https://www.youtube.com/watch?v=Zo3SlpLQaPA&t=670s> Acesso em: 10 jun 2022.

SILVA, I. B. *et al.* **Materiais aplicados à geração de energia solar em edificações.** In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2018, 8p. Gramado, 2018a.

SILVA, L. S.S. *et al.* **Análise do avanço da geração distribuída no Brasil.** In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2018, 10p. Gramado, 2018b.

SILVA, H. T. **Estudo sobre a interação de métodos anti-ilhamento para sistema fotovoltaico conectados à rede de distribuição de baixa tensão com múltiplos inversores.** 2016. 150p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade São Paulo. São Paulo, 2016.

SIMIONI, R. L. **Motivações históricas do código florestal brasileiro: energia ou meio ambiente?** 2011. Lusíada. Direito e Ambiente, Lisboa, n. 2/3. 2011

SIQUEIRA, C. D. **Segurança energética e regime internacional de mudanças climáticas: o papel da burocracia pública brasileira na elaboração de diretrizes políticas.** 2010. 138 p. Dissertação (Mestrado em relações internacionais). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

SOARES, E. V. *et al.* **Análise de distorção harmônica em função da potência de geração fotovoltaica instalada em um Campus Universitário.** 2021. Anais do Simpósio Brasileiro De Sistema Elétricos – SBSE. Sociedade brasileira de automática. Vol 1, n 1. *Published:* 2021-02-25

SUNRISE-AND-SUNSET. [2021?] Disponível em: <https://www.sunrise-and-sunset.com/pt/sun/brasil/foz-do-iguacu>. Acesso em: 20/07/2021

TESSMER, H. **Uma síntese histórica da evolução do consumo de energia pelo homem.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v.3, n.3, s/p. 2013.

UFRGS. **Tensão nominal (fase-neutro) nas cidades brasileiras, por estado.** *Last up date:* 22/08/2019. Disponível em:
<https://www.inf.ufrgs.br/~cabral/Tensao.nominal.estados.Brasil.html>. Acesso em: 20/03/2022

UMAYA, M. *et al.* **Wind Power Generation - Development status of Offshore Wind Turbines.** Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. Tokyo, v. 50 n. 3, p. 29-35, september. 2013. Disponível em: colômbia
<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e503/e503029.pdf>. Acesso em 22/01/21