



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CÂMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IZABELA GONZAGA DA SILVA

**ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM USINA FOTOVOLTAICA CONEC-
TADA À REDE: ESTUDO DE CASO DA USF DO CÂMPUS DE PALMAS DA UNI-
VERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS – UFT**

Palmas, TO
2022

IZABELA GONZAGA DA SILVA

ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM USINA FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE: ESTUDO DE CASO DA USF DO CÂMPUS DE PALMAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS – UFT

Monografia apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins - Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, para obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientadora: Prof. M^a. Gisele S. Parmezzani Marinho.

Palmas, TO

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S586a Silva, Izabela Gonzaga da .
Análise de Distorção Harmônica em Usina Fotovoltaica Conectada à Rede: Estudo de Caso da USF do Câmpus de Palmas da Universidade Federal Do Tocantins – UFT . / Izabela Gonzaga da Silva. – Palmas, TO, 2022.
59 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2022.
Orientadora : Gisele Souza Parmezani Marinho

1. Qualidade de energia. 2. Distorção harmônica. 3. Geração distribuída. 4. Usina fotovoltaica. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO


IZABELA GONZAGA DA SILVA

ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM USINA FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE: ESTUDO DE CASO DA USF DO CAMPUS DE PALMAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS – UFT


Projeto de Graduação foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 29 / 06 / 2022


Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 GISELE SOUZA PARMEZZANI MARINHO
Data: 04/07/2022 17:36:24-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. M^a. Gisele Souza Parmezani Marinho, UFT

Documento assinado digitalmente
 PRISCILA DA SILVA OLIVEIRA
Data: 04/07/2022 16:58:11-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr^a. Priscila da Silva Oliveira, UFT

Documento assinado digitalmente
 ALCY MONTEIRO JUNIOR
Data: 29/06/2022 11:59:14-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. M^c. Alcy Monteiro Junior, UFT

Palmas, 2022

Dedico este trabalho a Deus que me deu força durante a caminhada. Aos meus pais Jailson e Antonia, à minha irmã Daniela e à minha sobrinha Antonela, por todo o incentivo, apoio e a compreensão nas horas de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Antonia e Jailson, por todo amor e o apoio incondicional que sempre me deram, me mostrando que posso alcançar os meus sonhos com esforço e dedicação. Essenciais para o meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional. Agradeço também à minha irmã Daniela e minha sobrinha Antonela que sempre me apoiaram e torceram por mim.

Agradeço ainda a todos os professores do curso de Engenharia Elétrica da UFT que contribuíram para minha formação ao longo do curso. Em especial, agradeço à minha orientadora Prof. M^a. Gisele S. Parmezzani Marinho pela orientação, paciência e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de faculdade com os quais dividi a caminhada. Em especial, agradeço à Lohuana Alice, João César e Gabriel pela amizade e apoio desde o primeiro dia de aula até a conclusão do curso.

Enfim, agradeço a todos os meus familiares e amigos que acompanharam a minha trajetória e sempre torceram por mim.

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade analisar a qualidade de energia da usina solar fotovoltaica situada no câmpus universitário de Palmas-TO, da Universidade Federal do Tocantins por meio da análise de distorção harmônica. Para isso, é apresentada uma fundamentação teórica acerca de geração distribuída, qualidade de energia, sistemas de energia solar fotovoltaicos, inversores e harmônicas em sistemas elétricos, e das normas e regulamentações vigentes, nacionais e internacionais, sobre o tema, sendo realizado também um estudo de caso relativo à distorção harmônica na usina solar fotovoltaica da universidade, para isto, foi realizado o monitoramento de uma ramificação da usina, localizada no Bloco J, por meio do analisador de qualidade de energia *Fluke 1738*, o qual permitiu obter os indicadores de distorção harmônica do gerador fotovoltaico para que posteriormente fosse realizada a análise dos dados de modo a observar a concordância dos dados obtidos com os valores de referência presentes nas normas, regulamentos e padrões vigentes. Desta análise concluiu-se os equipamentos estão dentro dos padrões esperados.

Palavras-chaves: Qualidade de energia. Distorção harmônica. Geração distribuída. Usina fotovoltaica.

ABSTRACT

This paper has the purpose of analyzing the quality of photovoltaic solar energy, located on the university campus of Palmas-TO, Federal University Tocantins through harmonic distortion analysis. For this, a theoretical foundation is presented about distributed generation, energy quality, photovoltaic solar energy systems, energy and harmonic inverters, and the current national and international norms and regulations on the subject, being also carried out a case study related to harmonic distortion in the university's photovoltaic solar plant, that is, the motor of a transformation of the plant, located in Block J, was carried out through the Fluke 1738 power quality study, which wants to obtain the indicators of distortion of the photovoltaic generator so that later the data could be performed in order to observe the values of agreement of the data obtained with the references presented in the norms, regulations and standards in force. From this analysis concluded, the equipment is within the expected standards.

Key-words: Power quality. Harmonic distortion. Distributed generation. Photovoltaic plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede Elétrica Tradicional	16
Figura 2 - Rede com Geração Distribuída	17
Figura 3 - Retificador monofásico com diodos e filtro capacitivo	19
Figura 4 - Corrente pulsada de saída (tracejada)	20
Figura 5 - Esquemático de um sistema fotovoltaico conectado à rede.....	21
Figura 6 - Estratégia de modulação PWM de 2 níveis	23
Figura 7 - Forma de onda distorcida e suas componentes fundamental e harmônicas.....	24
Figura 8 - <i>Fluke 1738 Power Logger</i>	33
Figura 9 - Inversores em Funcionamento e Quadro Geral do SFCR.....	37
Figura 10 – Parte interna do quadro geral do SFCR do Bloco J	38
Figura 11 - Quadro Geral do SFCR do Bloco J Conectado ao Medidor <i>Fluke 1738</i>	39
Figura 12 - Configuração do Medidor de Qualidade de Energia <i>Fluke 1738</i>	40
Figura 13 - Dados de corrente e tensão das cargas conectadas ao quadro geral	40
Figura 14 - Distorção Harmônica Total (DHT%) percentual média de tensão por fase	43
Figura 15 - DHT% média de tensão por harmônica em relação a componente fundamental (h1)	43
Figura 16 - Distorção Harmônica Total (DHT%) percentual média de corrente por fase	45
Figura 17 - Distorção Harmônica Total (DHT%) de corrente por fase e corrente por fase durante o dia 13/06/2021	45
Figura 18 - Distorção Harmônica Total (DHT%) de corrente por fase e corrente por fase durante o dia 15/06/2021	46
Figura 19 - DHT% média de corrente por harmônica em relação a componente fundamental (h1)	48
Figura 20 - Distorção Harmônica Total (DHT%) percentual média de tensão por fase ao decorrer do dia 16/06/2021	50
Figura 21 - DHT% de tensão média ao decorrer do dia 16/06/2021	51
Figura 22 - Distorção Harmônica Total (DHT%) percentual média de corrente por fase ao decorrer do dia 16/06/2021	51
Figura 23 - DHT% de corrente média ao decorrer do dia 16/06/2021	52
Figura 24 - Corrente da usina ao decorrer do dia 16/06/2021	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades Consumidoras com Geração Distribuída.....	18
Tabela 2 - Limites de Distorção Harmônica Total de Tensão	27
Tabela 3 - Limites de Distorção Harmônica de Demanda para Sistemas de 120V a 69kV	28
Tabela 4 - Limites de Distorção de Corrente.....	29
Tabela 5 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	30
Tabela 6 - Classificação dos equipamentos	31
Tabela 7 - Limites de harmônicas de corrente.....	31
Tabela 8 - Requisitos do sistema	34
Tabela 9 - Dados dos transformadores do Câmpus Palmas.....	35
Tabela 10 - Relação dos transformadores do Câmpus Palmas com suas respectivas cargas ...	36
Tabela 11 - Especificações Técnicas do SFCR do Bloco J	36
Tabela 12 - Especificações Técnicas dos Inversores do SFCR do Bloco J.....	36
Tabela 13 - Informações de registro do monitoramento.....	42
Tabela 14 - DHT% média de tensão por harmônica	43
Tabela 15 – Relação de DHT% de corrente com corrente	46
Tabela 16 - DHT% média de corrente por harmônica.....	48
Tabela 17 - Informações de registro do monitoramento diário de 16/06/2021	49
Tabela 18 – Relação de DHT% de corrente com corrente do dia 16/06/2021	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DHD	Distorção Harmônica de Demanda
DHT	Distorção Harmônica Total
DHT-I	Distorção Harmônica Total de Corrente
DTT	Distorção Harmônica Total de Tensão
GD	Geração Distribuída
Hz	Hertz
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
kV	Quilovolt
kVA	Quilovoltampere
kW	Quilowatt
kWp	Quilowatt Pico
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RU	Restaurante Universitário
SIGA	Sistema de Informações de Geração da ANEEL
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
UC	Unidade Consumidora
UFT	Universidade Federal do Tocantins

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Metodologia	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Geração distribuída e regulamentação	16
2.2	Qualidade de energia	18
2.2.1	Cargas não lineares e sistemas fotovoltaicos conectados à rede	19
2.3	Fundamentos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede	21
2.3.1	Inversores	22
2.4	Harmônicas	24
2.4.1	Indicadores de Distorção Harmônica	25
2.5	Normas e padrões vigentes	26
2.5.1	IEEE Std 519TM:2014 - Recomendação prática e requisitos para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de potência	27
2.5.2	IEC 61727 - Sistemas fotovoltaicos - Características de conexão com a concessionária	28
2.5.3	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8	29
2.5.4	IEC 61000-3-2 - Compatibilidade Eletromagnética - Parte 3-2: Limites - Limites para emissão de harmônicos de corrente (corrente de entrada do equipamento <16A por fase)	30
2.5.5	Norma Portuguesa EN 50160:2001 - Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia elétrica	32
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	33
3.1	Equipamento	33
3.2	Software	34
3.3	Estudo de caso	35
3.3.1	Especificação Geral da Rede Elétrica e dos SFCR do Câmpus de Palmas da UFT	35
3.4	Metodologia	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42

4.1	Distorção Harmônica Total de Tensão percentual média	42
4.2	Distorção Harmônica Total de Corrente percentual média	45
4.3	Análise de Distorção Harmônica Total durante um dia	49
4.3.1	Distorção Harmônica Total de Tensão percentual média durante um dia.....	50
4.3.2	Distorção Harmônica Total de Corrente percentual média durante um dia	51
5	CONCLUSÃO.....	54
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas a diversificação da matriz energética brasileira teve um grande crescimento, tendo como destaque o uso de fontes renováveis de energia. Entre as fontes de energia limpa disponíveis no mercado a energia solar fotovoltaica tem tido maior destaque, tendo conseguido se estabelecer como uma fonte de energia acessível, confiável e vantajosa.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2022), no ano de 2021 no Brasil 44,7% da energia utilizada era proveniente de fontes renováveis, sendo 0,48% solar fotovoltaica. Percentual que comparado ao ano de 2020 representa um crescimento de 55,9% dessa fonte. Com isso, fica evidente o potencial de crescimento da energia solar fotovoltaica.

Além disso, segundo dados obtidos no Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), a matriz energética brasileira possui 11.285 (onze mil e duzentos e oitenta e cinco) centrais geradoras fotovoltaicas em operação (microgeração e minigeração), com uma potência outorgada de 5.328.487,04 kW, sendo o Tocantins correspondente a 5.000,00 kW.

Conectado diretamente ao desenvolvimento da energia fotovoltaica temos o emprego de geradores distribuídos. Estes geradores recebem esse nome por participarem de um método de geração de energia descentralizada, que tem como objetivo permitir que os consumidores produzam a própria energia, fazendo assim que a energia gerada seja fornecida às cargas que estão próximas desses equipamentos.

Devido aos geradores fotovoltaicos possuírem particularidades de funcionamento, envolvendo o uso de dispositivos eletrônicos, como por exemplo os inversores, de acordo com Monteiro Júnior (2014 *apud* LATHEEF, 2006), “A geração fotovoltaica é considerada como uma das principais fontes de componentes harmônicas nas redes elétricas, apesar do emprego de inversores comandados por modulação de largura de pulso (comando PWM) produzir um conteúdo harmônico reduzido e diversificado nas correntes”.

Com isso, a fim de garantir a excelência e a segurança da rede com geração distribuída, torna-se fundamental a definição e regulamentação de indicadores de qualidade, estabelecendo limites ou valores de referência para o prosumidor¹. E o nível de distorção harmônica é um parâmetro importante, pois quando fora dos limites adequados pode trazer prejuízos as cargas do consumidor, e até mesmo a rede de distribuição.

¹ Termo utilizado para denominar participantes do sistema de geração distribuída que se caracterizam como produtor e consumidor de energia.

1.1 Justificativa

A fim de garantir a qualidade da energia elétrica fornecida por centrais geradoras, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) utiliza-se de um conjunto de normas consolidados através do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional).

Em seu módulo oito, o PRODIST define os fenômenos relacionados a qualidade de energia, e estabelece seus indicadores e os valores de referência. Entre os fenômenos a serem acompanhados quando da qualidade de energia têm-se: fator de potência, variação de frequência, desequilíbrio de tensão, harmônicos, entre outros.

Os sistemas de geração de energia fotovoltaica têm como base para seu funcionamento o uso de inversores de energia. Eles têm como objetivo transformar a corrente contínua, gerada pelos módulos fotovoltaicos, em corrente alternada, tornando assim a corrente adequada para consumo em aparelho convencionais e para injeção da energia gerada no sistema de distribuição. Para realizar essa conversão os inversores utilizam uma metodologia denominada chaveamento de corrente, que resulta em distorções harmônicas de tensão e corrente.

Dessa forma, sendo os inversores fotovoltaicos fonte de distorções harmônicas, é de suma importância a análise e estudo desse fenômeno em centrais geradoras fotovoltaicas, para assim garantir a qualidade da energia gerada e dos equipamentos utilizados, além da segurança dos consumidores e a prevenção de perdas e danos.

Por isso, nesse escrito será realizado um estudo de caso na usina fotovoltaica de 600 kWp situada no Câmpus de Palmas da UFT (Universidade Federal do Tocantins), mediante análise da injeção de harmônicos em uma ramificação do sistema de distribuição por meio de inversores fotovoltaicos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a qualidade de energia em uma ramificação da rede de distribuição, com usina fotovoltaica, do Câmpus de Palmas da Universidade Federal do Tocantins, mediante estudo da injeção de harmônicos por meio de inversores fotovoltaicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Pesquisa bibliográfica sobre sistemas fotovoltaicos conectados à rede e distorções harmônicas.
- Analisar a injeção de harmônicos na rede de distribuição devido a conexão da usina fotovoltaica do Câmpus Palmas, por meio de medições realizadas em uma ramificação da usina no Bloco J.
- Avaliar os indicadores de qualidade de energia, relacionados a injeção de harmônicas na rede de distribuição, de acordo com os parâmetros definidos pelas legislações vigentes.

1.3 Metodologia

Os procedimentos metodológicos que serão adotados para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso serão:

- Revisão bibliográfica, sobre temas relacionados ao estudo de distorções harmônicas em usinas fotovoltaicas;
- Coleta de dados, por meio de medições realizadas em uma ramificação da usina (Bloco J) com equipamentos adequados;
- Análise de dados obtidos, tendo como referência os parâmetros de qualidade definidos pelas legislações vigentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

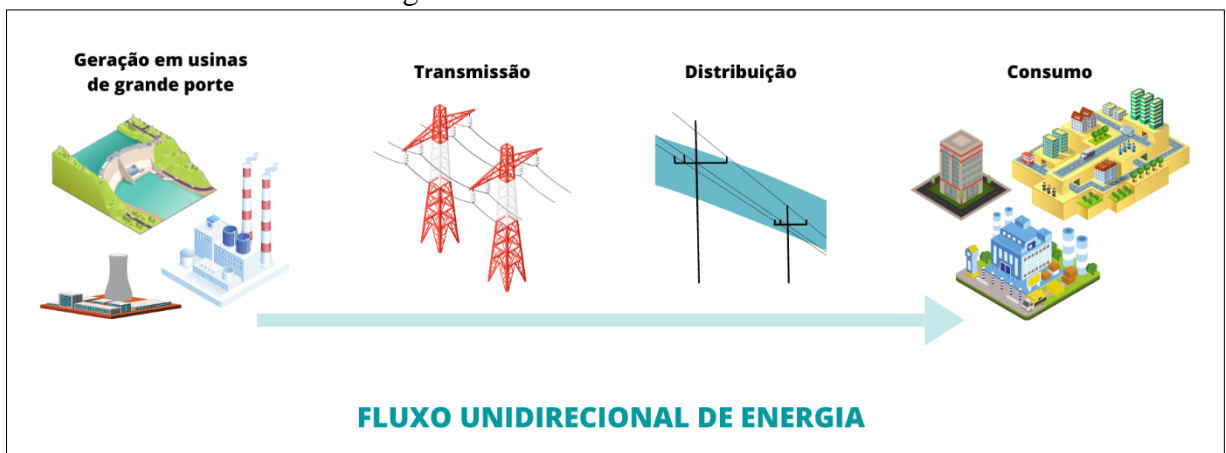
2.1 Geração distribuída e regulamentação

“De maneira geral, a Geração Distribuída - GD pode ser entendida como sistemas de potência de capacidade reduzida que ficam alocados próximos ao centro de consumo, sem a necessidade de extensas redes para sua transmissão” (BARBOSA, 2018, p. 6). Assim sendo, esses sistemas podem ter as mais variadas fontes de energia como solar, biomassa, eólica, entre outras.

De toda forma, independente da fonte de energia adotada, a concepção da geração distribuída traz uma nova abordagem à forma de geração e ao consumo de energia elétrica. Enquanto a rede elétrica tradicional possui um fluxo de potência unidirecional em que a geração fica centralizada em grandes usinas e o consumidor tem um papel final, a geração distribuída possibilita que os consumidores também possam ser fornecedores de energia, por meio de um fluxo de potência bidirecional e da geração descentralizada. Nas figuras 1 e 2 são ilustradas essas duas modelagens de rede elétrica, tradicional e distribuída.

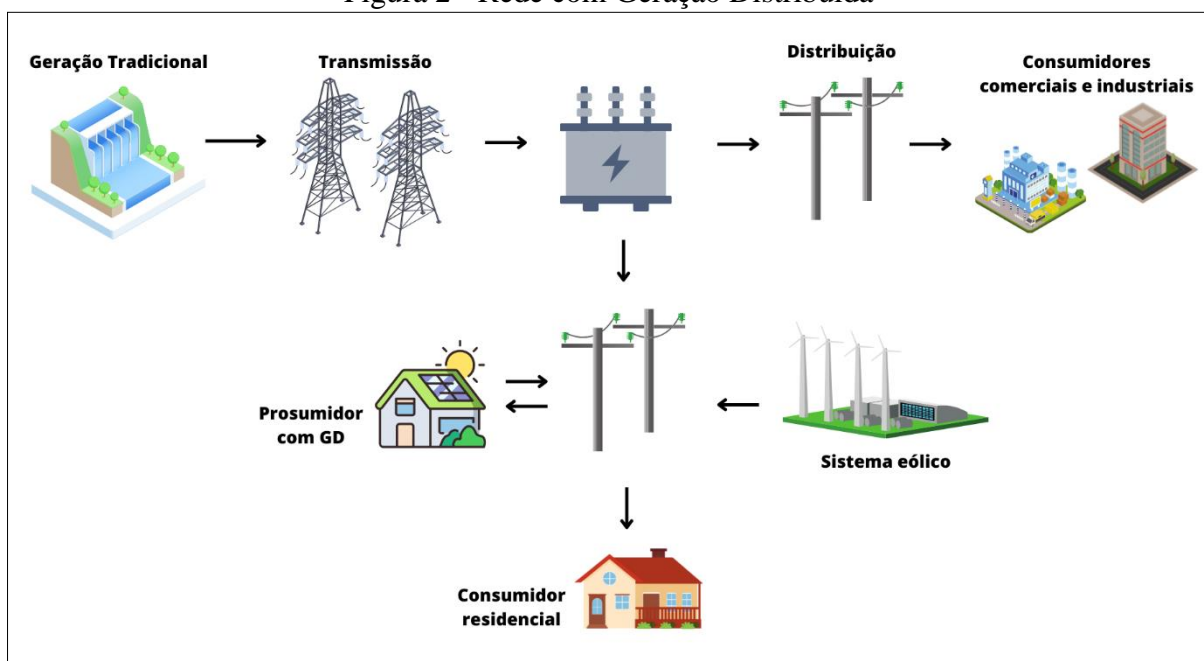
No Brasil o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, podendo ainda fornecer o excedente para a rede de distribuição da sua localidade desde 17 de abril de 2012. Data essa em que a Resolução Normativa N° 482, convencionada pela Agência Nacional de Engenharia Elétrica – ANEEL, entrou em vigor.

Figura 1 - Rede Elétrica Tradicional



Fonte: Arquivo da autora (2022).

Figura 2 - Rede com Geração Distribuída



Fonte: Arquivo da autora (2022).

Em suma, a norma estabelece as premissas gerais para o ingresso dos sistemas microgeração e minigeração distribuída a rede de distribuição de energia elétrica, para adesão ao sistema de compensação de energia, além de outras diligências.

Sendo que, a Lei nº 14.300 de 06 de janeiro de 2022 define como microgeração distribuída a central geradora de energia elétrica com potência menor ou igual a 75 kW, e minigeração distribuída a central geradora de energia elétrica com potência superior a 75 kW e menor ou igual a 3MW para as fontes não despacháveis², sendo ambas fontes renováveis de energia elétrica conectadas a rede de distribuição por meio de unidades consumidoras.

Ao longo dos últimos anos além de revisões da REN nº 482, a ANEEL publicou novas normas importantes para estabelecimento de parâmetros para melhorar o acesso de sistemas de micro e minigeração ao sistema de distribuição, e esclarecer para o consumidor informações de fatura. Entre os conteúdos importantes para tal podemos citar a seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST, que descreve os procedimentos para acesso dos sistemas de micro e minigeração distribuída ao sistema de distribuição.

De acordo com dados do SIGA de junho de 2022, exibidos na tabela 1, a maior parte da energia proveniente de unidades consumidoras com geração distribuída é de usinas fo-

² “Por ‘não despacháveis’ denominamos as fontes não controladas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). A energia por elas produzida é diretamente injetada na rede a partir da disponibilidade do recurso natural primário.” (IEMA, 2016, p. 5). Sendo as principais fontes de energia não despacháveis a energia solar e eólica.

tovoltaicas (UFV), seguida pelas unidades termelétricas (UTE), centrais geradoras eólicas (EOL) e por último centrais geradoras hidrelétricas (CGH).

Tabela 1 - Unidades Consumidoras com Geração Distribuída

Tipo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem créditos	Potência Instalada (kW)
CGH	75	17.183	69.521,67
EOL	90	160	17.155,10
UFV	1.075.372	1.364.006	11.334.581,41
UTE	393	7.062	122.065,08

Fonte: ANEEL (2022). Adaptado pela autora.

Observando os dados da tabela 1 fica claro o crescimento e potencial das usinas fotovoltaicas, reafirmando assim a importância do estudo e aprimoramento desses sistemas de geração de energia.

2.2 Qualidade de energia

Nas últimas décadas, com o desenvolvimento dos setores de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica – em destaque o aumento significativo da geração distribuída em todo o país, a qualidade dos recursos energéticos tornou-se um tema importante para toda a sociedade.

De acordo com Martinho (2009), “A qualidade de energia é a compatibilidade entre a fonte de energia e o equipamento elétrico ligado a essa energia fornecida, ou seja, é a forma que a eletricidade encontra de atender às necessidades de quem a utiliza.”.

Em outras palavras, quando se trata de qualidade de energia pode-se afirmar que esta é a base para que as cargas conectadas a um sistema funcionem de forma satisfatória. Contudo, cada usuário demanda de um índice de qualidade da energia de forma diferente, estabelecido pelos equipamentos utilizados por ele.

Isso ocorre porque os parâmetros de qualidade de energia têm como finalidade garantir o funcionamento adequado de equipamentos elétricos conectados ao sistema, assegurando assim a vida útil do equipamento e evitando perdas. Porém, como as especificações variam de um equipamento para outro, um sinal que pode ser considerado fora dos padrões para um equipamento pode ser aceitável para outro. No entanto, os órgãos competentes pela geração, transmissão e distribuição devem seguir padrões para assegurar sua confiabilidade.

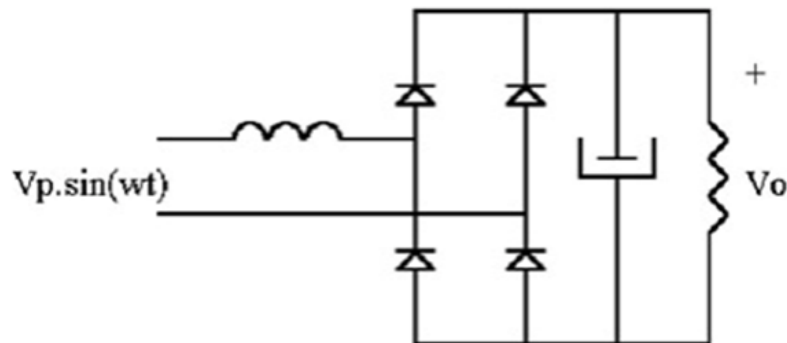
Todos os indicadores de qualidade de energia são definidos pelas agências reguladoras de energia elétrica (no Brasil a ANEEL) e por recomendações e padronizações de órgãos como o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) e a Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission – IEC*), nos Estados Unidos e Europa respectivamente, que tem como principal objetivo garantir a qualidade do produto oferecido, para tal, são consideradas características relacionadas a forma de onda, amplitude ou distorção. Além da qualidade do serviço, relacionando o número de interrupções no fornecimento de energia e a duração de tais, entre outros.

Assim sendo, a responsabilidade pela garantia da qualidade de energia não é responsabilidade apenas da concessionária, mas também do prosumidor, ou do apenas consumidor, que pode poluir o sistema elétrico, por exemplo, com a injeção de harmônicos de corrente. Esse fenômeno é comumente consequente de cargas não lineares, como computadores, inversores de frequência, entre outras cargas. Essas cargas geram correntes distorcidas que acarretam a distorção da forma de onda de tensão, o que acaba impactando diretamente a qualidade de energia de toda a instalação (ROCHA, 2016, p. 4).

2.2.1 Cargas não lineares e sistemas fotovoltaicos conectados à rede

De acordo com Rocha (2016), “Uma carga é dita não linear quando distorce a forma de onda de corrente mesmo quando alimentada com uma forma de onda de tensão senoidal.”. Um retificador com diodos e um filtro capacitivo na saída é um exemplo bastante simples e corriqueiro desse tipo de carga. Tal dispositivo tem seu circuito representado na figura 3.

Figura 3 - Retificador monofásico com diodos e filtro capacitivo

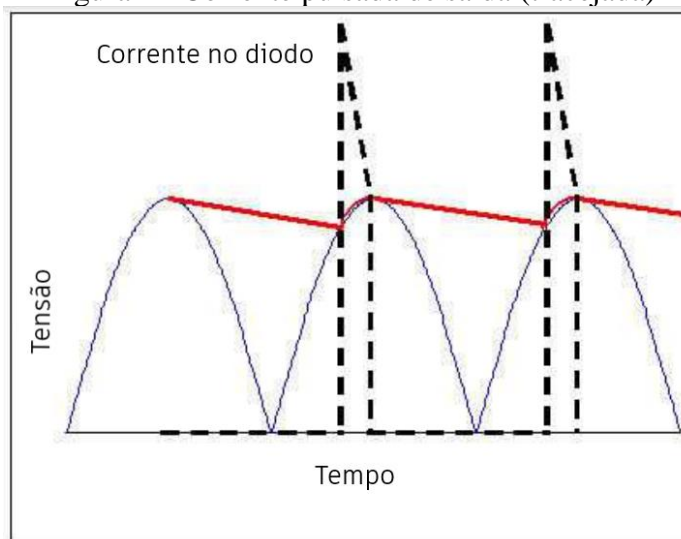


Fonte: ROCHA (2016).

Nesse retificador a corrente apenas circula quando a tensão instantânea da fonte superar a tensão do filtro capacitivo. Em outras palavras, a corrente só entra no retificador quando

a forma de onda da tensão estiver perto do pico. Isso faz com que a forma de corrente de saída seja pulsada, conforme podemos verificar na figura 4 o sinal tracejado, diferindo totalmente da corrente de entrada que era senoidal.

Figura 4 - Corrente pulsada de saída (tracejada)



Fonte: ROCHA (2016).

De acordo com Fontão (2017) as cargas não lineares podem ser classificadas em três categorias, com base na sua natureza de deformação, são elas:

- Categoria 1: nessa encontram-se os equipamentos com características operativas de arcos voltaicos, são eles: fornos a arco, máquina de soldas, lâmpada de descarga, entre outros.
- Categoria 2: enquadram-se nessa os equipamentos de núcleo magnético saturado, tais como: reatores e transformadores de núcleo saturados.
- Categoria 3: pertencem a essa categoria os equipamentos eletrônicos, como: inversores, retificadores, televisores, micro-ondas, computadores, entre outros.

Na segunda categoria a natureza da deformação é oriunda da não linearidade do circuito magnético. E na última categoria, a natureza da deformação da corrente é oriunda da não linearidade dos componentes eletrônicos. Sendo que o retificador utilizado para explanação do tema faz parte da categoria 3 (três).

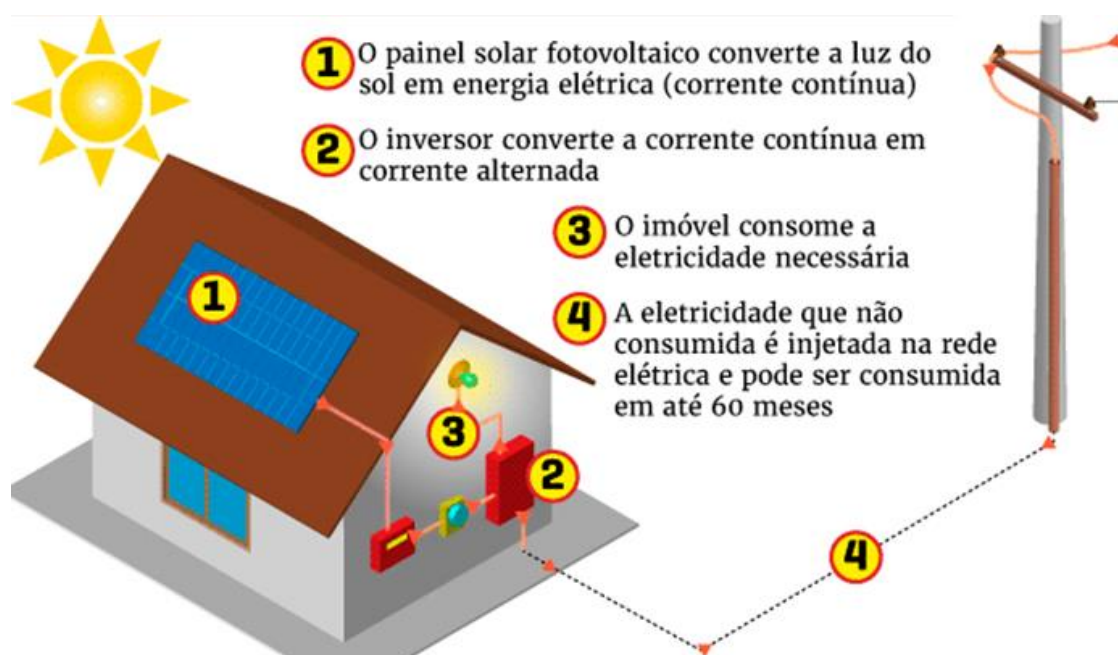
Assim sendo, as cargas não lineares são fontes clássicas de distorções harmônicas. Um fenômeno importante para a garantia da qualidade de energia e objeto de estudo desse escrito.

2.3 Fundamentos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica operam de forma paralela a rede de distribuição de energia. Isso se dá pelo fato deles não possuírem dispositivos de armazenamento de energia. Com isso, no caso dos prosumidores todo o excedente de energia gerado pelo sistema é injetado na rede elétrica, e no caso das usinas exclusivas de geração, toda a energia produzida é inserida na rede.

O sistema é basicamente composto por módulos fotovoltaicos responsáveis pela geração de energia, pelo inversor que tem como finalidade realizar a conversão de corrente contínua para corrente alternada, além dos dispositivos de proteção e medição da energia produzida. A figura 5 é uma ilustração desse tipo de sistema fotovoltaico.

Figura 5 - Esquemático de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: CAMARGO (2017).

Descrevendo o processo representado na figura 5 de forma sucinta, primeiro os raios solares incidem sobre os painéis solares e nesses dispositivos se dá o efeito fotovoltaico, responsável pela geração da energia. Logo em seguida a tensão produzida em corrente contínua chega ao inversor, que realiza a conversão CC-CA e direciona a energia para a carga conectada, e então, após o imóvel consumir a eletricidade demandada a eletricidade não consumida é injetada na rede de distribuição.

Dessa forma, percebe-se que o inversor desempenha um papel fundamental nesse processo pois além de realizar a conversão de corrente, ele também garante a qualidade da corrente que irá para as cargas e/ou para a rede. Pois, ele assegura que ela tenha o formato senoidal e esteja com a mesma frequência da rede, além de atender outros requisitos impostos pela concessionária de energia.

2.3.1 Inversores

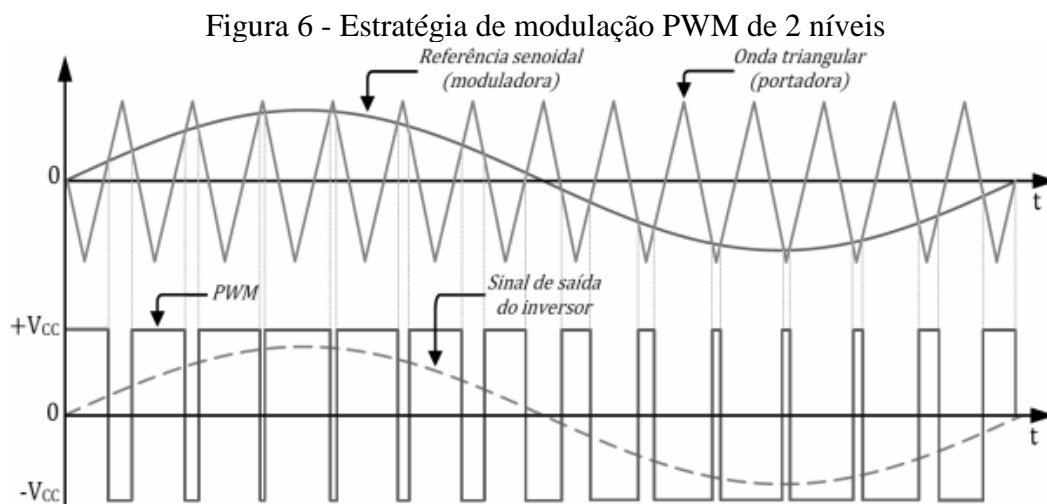
Inversores fotovoltaicos são caracterizados pelo emprego de dispositivos eletrônicos de chaveamento, tais como IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), e por ter como objetivo quebrar um sinal de CC em pulsos, resultando assim em um sinal de CA. O uso desses componentes eletrônicos como dispositivos de controle de condução faz com que esse dispositivo seja caracterizado como uma carga não linear que contém um alto conteúdo harmônico. Dessa forma, para reduzir o nível de injeção harmônica desse equipamento são utilizadas técnicas de modulação de sinal afim de ajustar o intervalo de condução das chaves.

O uso de técnicas de modulação além de promover a redução no conteúdo harmônico, possibilita o controle da tensão de saída do inversor (NOVELIN, 2017). Entre as diversas estratégias de modulação existentes, a mais utilizada é a modulação por largura de pulso – em inglês *Pulse-Width Modulation* (PWM).

A modulação PWM tem como princípio a comparação contínua entre um sinal de uma onda de referência senoidal de baixa frequência, com uma forma de onda triangular de alta frequência denominada portadora (CASTRO, 2019, p. 50).

A figura 6 ilustra as formas de onda utilizadas para modulação PWM senoidal de dois níveis. No primeiro gráfico tem-se a onda na forma senoidal dita de referência, e a forma de onda triangular dita portadora. Ao serem comparadas e a saída do PWM aplicada as chaves, tem-se a forma de onda na saída do inversor representada no segundo gráfico, em que a tensão possui ciclos positivo e negativo.

Pelo fato de a tensão de saída assumir os valores $+V_{CC}$ e $-V_{CC}$ esse tipo de modulação é denominada modulação a dois níveis.



Fonte: CASTRO *apud* FORTES (2018).

Ademais, o inversor possui outras funções de controle que aprimoram o funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede, como o seguimento do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico, ou *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) e a detecção de ilhamento. (BARBOSA, 2018, p. 24 e 25)

As entradas MPPT são um recurso comum a todos os inversores para conexão à rede. Elas maximizam a potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos pois faz com que os esses operem em seu ponto de máxima potência constantemente, independente das condições de operação, pois busca continuamente a melhor relação de corrente e tensão.

Já a detecção de ilhamento³, ou anti-ilhamento, é uma funcionalidade obrigatória a todos os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. “A função da proteção anti-ilhamento é detectar a interrupção do suprimento de energia pela rede, e desconectar o sistema de geração automaticamente por meio de um dispositivo de interligação.” (BARBOSA, 2018, p. 30). Essa funcionalidade garante a segurança de operadores da manutenção da rede, dos consumidores em geral e, também zela pela qualidade da energia elétrica fornecida, uma vez que garante que o sistema de geração não irá operar fora do controle da concessionária.

Contudo, mesmo com uso de inversores com modulação por largura de pulso e recursos de controle, os geradores fotovoltaicos ainda são uma das principais fontes de harmônicas em sistemas elétricos, produzindo quantias baixas, mas de forma diversificada.

³ Segundo Pitombo (2010, p. 27 e 28), o ilhamento acontece quando uma ramificação da rede de distribuição torna-se eletricamente isolada da fonte de energia principal, mas continua sendo energizada por geradores distribuídos conectados no subsistema isolado.

2.4 Harmônicas

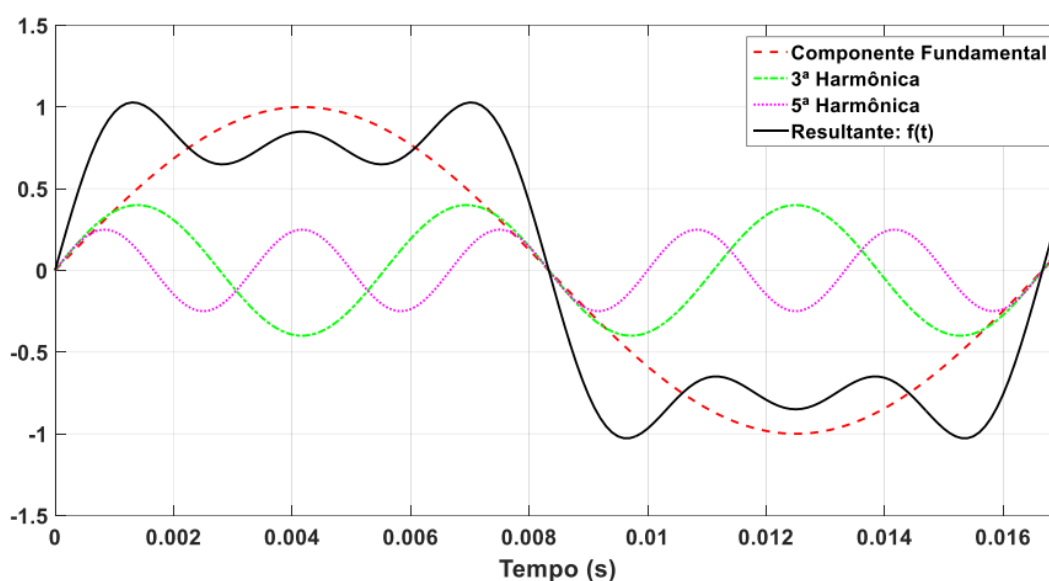
O módulo 8 (oito) do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) estabelece o nível de distorção harmônica como um parâmetro de qualidade de energia, tendo em vista que o escrito no tópico 43 define que: “As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.” (ANEEL, 2022).

Em outras palavras, o termo harmônico é utilizado para se referir a uma forma de onda deformada, sendo que, o conceito do termo está relacionado a uma abstração matemática. Isto posto, harmônicos são uma representação matemática de uma forma de onda distorcida.

Uma forma de onda periódica e deformada pode ser escrita como uma soma de ondas senoidais puras com frequências múltiplas da fundamental através da Transformada de *Fourier*. Sendo que, o método de tratar a distorção de onda como um conjunto de componentes, é uma forma de tornar análise e os cálculos para mensurar o fenômeno de distorção harmônica mais compreensível.

Na figura 7, tem-se a representação de uma forma de onda distorcida e tem-se o conjunto de senoides que a constituem, sendo uma a forma de onda fundamental (mesma frequência da onda originária) e outras duas harmônicas (frequências diferentes e múltiplas da fundamental).

Figura 7 - Forma de onda distorcida e suas componentes fundamental e harmônicas



Fonte: CASTRO (2019).

Ademais, acerca das origens dos harmônicos de corrente e tensão, de acordo com Rocha (2016),

Os harmônicos de corrente são produzidos por cargas não lineares, tais como equipamentos de eletrônica de potência. Essas cargas geram correntes não senoidais mesmo sendo alimentadas com tensão senoidal. Essas correntes distorcidas ao circularem pela impedância do sistema, que é constituída pela impedância da fonte mais impedância da fiação e transformadores, provocam a distorção da onda de tensão. Essa é a origem dos harmônicos de tensão, pois a concessionária produz, na geração, uma onda senoidal pura de tensão.

2.4.1 Indicadores de Distorção Harmônica

O estabelecimento de limites de distorções harmônicas de corrente e tensão é importante para suavizar, ou até mesmo impedir, os problemas que tais distorções podem causar a equipamentos e/ou a uma rede de distribuição.

Dessa forma, a fim de quantificar e qualificar a distorção harmônica de uma instalação em relação a conformidade com as normas e regulamentações, foram criados alguns indicadores importantes. Nessa literatura serão abordados dois parâmetros básicos e fundamentais para o estudo de harmônicas, são eles: Distorção Harmônica Total (DHT) e Distorção Harmônica de Demanda (DHD).

➤ Distorção Harmônica Total

A distorção harmônica total é a relação entre o valor eficaz das componentes harmônicas e a componente fundamental correspondente (na qual está sendo provocada a deformação da onda). Tal indicador pode ser relacionado a corrente ou tensão. Nas equações 1 e 2 são apresentadas ambas as formulações para cálculo da DHT em percentual, para corrente e tensão respectivamente.

$$DHT_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (1)$$

Sendo:

- h : ordem da harmônica;
- I_h : corrente da harmônica;

- $\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}$: Valor eficaz dos harmônicos de corrente;
- I_1 : Valor da corrente fundamental.

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

Sendo:

- h : ordem da harmônica;
- V_h : tensão da harmônica;
- $\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}$: Valor eficaz dos harmônicos de tensão;
- V_1 : Valor da tensão fundamental.

➤ Distorção Harmônica de Demanda

Similar à DHT, a Distorção Harmônica de Demanda é a relação entre o valor eficaz dos harmônicos de corrente e a demanda de corrente máxima do sistema (corrente nominal). Este é utilizado apenas para analisar a distorção na corrente, sendo um parâmetro fixo durante toda a análise. Na equação 3 é apresentada a formulação para cálculo da DHD.

$$DHD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_L} \quad (3)$$

Sendo:

- h : ordem do harmônica;
- I_h : corrente da harmônica;
- I_L : demanda máxima da corrente ou corrente nominal.

2.5 Normas e padrões vigentes

De forma a garantir o funcionamento eficiente e seguro da rede de distribuição, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCCR) devem atender as normas e resoluções que

regulamam a geração distribuída. Tais regras são definidas por regulamentações nacionais e internacionais de órgãos como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronic Engineers – IEEE*), e a Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission – IEC*).

Assim sendo, na presente seção serão apresentadas as principais normas relativas aos níveis de distorção harmônica de tensão e corrente em sistemas fotovoltaicos, que posteriormente servirão de base para a avaliação qualitativa da energia elétrica fornecida pela Usina Fotovoltaica em estudo.

2.5.1 IEEE Std 519TM:2014 - Recomendação prática e requisitos para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de potência

A Recomendação 519:2014 do IEEE institui limites de distorção harmônica para formas de onda de tensão e corrente, visando assim reduzir os potenciais efeitos negativos sobre o usuário e os equipamentos de um sistema. Ademais, a referida norma trata das limitações para o estado estacionário e tem como interface de estudo o denominado Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que é o ponto de conexão entre as fontes e as cargas do sistema.

Nas tabelas 2 e 3 podemos verificar os parâmetros estabelecidos para distorção de tensão e para a distorção de corrente para sistemas de 120V a 69kV.

Tabela 2 - Limites de Distorção Harmônica Total de Tensão

Tensão de Barramento no PAC	Harmônica Individual (%)	Distorção Harmônica Total DHT (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1.0 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} \leq V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} \leq V$	1.0	1.5

Fonte: Traduzido de IEE STD 519TM (2014).

Tabela 3 - Limites de Distorção Harmônica de Demanda para Sistemas de 120V a 69kV

Distorção máxima de corrente harmônica em percentual de I_L						
Ordem de harmônica individual (harmônicos ímpares)						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte: Traduzido de IEE STD 519TM (2014).

Na tabela 3 temos que, a sigla I_{SC} refere-se a máxima corrente de curto-circuito no PAC, e I_L a corrente máxima de demanda no PAC. Além disso, tem-se a Distorção Harmônica de Demanda, que se trata da relação da raiz quadrada média do conteúdo harmônico, considerando os componentes harmônicos até a ordem 50 e excluindo os inter-harmônicos, expressa como um percentual da corrente de demanda máxima.

2.5.2 IEC 61727 - Sistemas fotovoltaicos - Características de conexão com a concessionária

A Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission – IEC*), é uma organização mundial que tem como objetivo promover a cooperação internacional em todas as questões concernentes a padronização nas áreas elétrica e eletrotécnica.

A publicação da IEC 61727 do ano de 2004, estabelece as condições para a interligação de sistemas fotovoltaico à rede de distribuição de energia elétrica. Sendo que essa se aplica a sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição públicas, operando em paralelo com o utilitário e utilizando inversores estáticos com anti-ilhamento.

Em relação aos níveis de harmônicas, a norma afirma que baixos níveis de harmônicas de corrente e tensão são desejáveis, contudo, esses níveis dependem das características do sistema de distribuição, tipo de serviço, cargas conectadas e estabelecidas pela concessionária.

Dessa forma, a saída do sistema fotovoltaico deve ter níveis baixos de distorção de corrente afim de evitar que efeitos adversos sejam infligidos em outras cargas presentes no sistema de distribuição.

Por fim, o escrito afirma que a distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5% na saída do inversor analisado. Sendo que, cada harmônica individual tem seu limite tabelado, conforme descrito na tabela 4.

Tabela 4 - Limites de Distorção de Corrente

Harmônicas Ímpares	Limite de Distorção
3 ^a a 9 ^a	Menos de 4,0%
11 ^a a 15 ^a	Menos de 2,0%
17 ^a a 21 ^a	Menos de 1,5%
23 ^a a 33 ^a	Menos de 0,6%
Harmônicas Pares	Limite de Distorção
2 ^a a 8 ^a	Menos de 1,0%
10 ^a a 32 ^a	Menos de 0,5%

Fonte: Traduzido de IEC (2004).

Na tabela 4 podemos observar que conforme maior é a ordem da harmônica, menor o limite de distorção permitido. Também é possível observar que as harmônicas pares possuem limites de distorção menores que os de harmônicas ímpares.

2.5.3 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8

A Agência Nacional de Engenharia Elétrica – ANEEL, autarquia brasileira de regime especial, normatiza e padroniza as atividades técnicas referentes ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica do Brasil, por meio de dos documentos denominados Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Tais documentos são divididos nos denominados módulos e abordam temas como Cálculo de Perdas na Distribuição, Acesso ao Sistema de Distribuição, Qualidade de Energia, entre outros.

O Módulo 8 do PRODIST, estabelece os parâmetros relacionados a qualidade de energia elétrica, abordando aspectos relacionados a qualidade do produto oferecido e do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações.

Assim sendo, no que se refere qualidade do produto, o módulo define critérios como terminologia e indicadores, caracteriza fenômenos, firma limites ou valores de referência, relativos à tensão fundamental do sistema e as distorções na forma de onda dessa. Além de

estabelecer aspectos relativos à instrumentação e ao método de medição dos fenômenos ligados a qualidade do produto.

Em relação a harmônicas o Módulo 8 traz as seguintes informações relativas ao limite de distorções harmônicas totais em relação a tensão fundamental, apresentadas na tabela 5.

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

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 2,3\text{kV}$	$2,3\text{kV} \leq V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_n \leq 230\text{kV}$
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 (2022).

Sendo:

- DTT95%: referente a todas as ordens harmônicas de 2 até $h_{\text{máx}}$.
- DTT_p95%: referente a todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22\dots$)
- DTT_i95%: referente a todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ($h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25\dots$)
- DTT₃95%: referente a todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24\dots$)

2.5.4 IEC 61000-3-2 - Compatibilidade Eletromagnética - Parte 3-2: Limites - Limites para emissão de harmônicos de corrente (corrente de entrada do equipamento <16A por fase)

A norma 6000-3-2 da IEC avalia e define limites para harmônicas de corrente para equipamentos elétricos e eletrônicos com corrente nominal menor ou igual a 16A por fase. Sendo destinada a sistemas de distribuição em Baixa Tensão (BT).

De forma a aprimorar sua aplicação, a resolução classifica os equipamentos em quatro classes, conforme disposto na tabela 6.

Tabela 6 - Classificação dos equipamentos

Classe A	<ul style="list-style-type: none"> - Equipamentos trifásicos equilibrados - Aparelhos domésticos, exceto aqueles identificados como Classe D - Ferramentas, com exceção das portáteis - <i>Dimmers</i> para lâmpadas incandescentes - Equipamento de áudio - Todo equipamento não classificado como B, C e D
Classe B	<ul style="list-style-type: none"> - Ferramentas portáteis - Equipamento de solda a arco que não seja profissional
Classe C	<ul style="list-style-type: none"> - Equipamentos de Iluminação
Classe D	<ul style="list-style-type: none"> - Computadores pessoais e monitores de PC - Aparelhos de televisão <p>Nota: Potência de entrada $P \leq 600W$. Não há limites para $P < 75W$</p>

Fonte: Pereira *apud* IEC (2017).

Isto posto, a norma expõe os seguintes limites de harmônicas de corrente, com base na classe do equipamento e na ordem da harmônica. Tais parâmetros são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Limites de harmônicas de corrente

Ordem h	Classe A (A)	Classe B (A)	Classe C (% da fund.) P > 25W	Classe C (mA/W) P ≤ 25W	Classe D (mA/W)	Classe D (A)
Harmônicas ímpares						
3	2,30	3,45	$30 \times \lambda^4$	3,40	3,40	2,30
5	1,14	1,71	10	1,90	1,90	1,14
7	0,77	1,16	7	1,00	1,00	0,77
9	0,40	0,60	5	0,50	0,50	0,40
11	0,33	0,50	3	0,35	0,35	0,33
13	0,21	0,312	3	3,85/h	3,85/h	Ver Classe A
$15 \leq h \leq 39$	$0,15 \times 15/h$	$0,23 \times 15/h$	3	3,85/h	3,85/h	Ver Classe A
Harmônicas pares						
2	1,08	1,62	2	-	-	-
4	0,43	0,65	-	-	-	-
6	0,30	0,45	-	-	-	-
$8 \leq h \leq 40$	$0,23 \times 8/h$	$0,35 \times 8/h$	-	-	-	-

Fonte: Pereira *apud* IEC (2017).

⁴ O fator de potência.

Sendo os inversores a principal fonte de harmônicas em SFCR, tem-se que os valores de referência para análise de harmônicas em sistemas fotovoltaicos serão os da classe A, já que observando a tabela 6 o aparelho de conversão CC/CA se enquadra nesse grupo de equipamentos.

2.5.5 Norma Portuguesa EN 50160:2001 - Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia elétrica

A norma EN 50160 descreve as principais características da tensão de alimentação para redes públicas de distribuição em baixa e em média tensão. Assim sendo, a norma inclui limites de conformidade para tensão de fornecimento, frequência da tensão, desequilíbrio de tensão, tensão harmônica, entre outros.

Acerca dos limites definidos para harmônicas de tensão, a norma estabelece que a DHT da tensão de alimentação (incluindo as harmônicas até a ordem 40) não devem ultrapassar 8%.

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Esta seção apresenta os equipamentos utilizados para coleta de dados, além da metodologia empregada para realização das medições.

3.1 Equipamento

Para a coleta de dados acerca dos níveis de distorção harmônica foi utilizado o analisador de qualidade de energia *Fluke 1738 – Power Logger* pertencente ao laboratório de medidas da UFT – Câmpus Palmas, de patrimônio número 103601, e que é mostrado na figura 8.

Figura 8 - *Fluke 1738 Power Logger*



Fonte: Arquivo da Autora (2022).

Tal equipamento da *Fluke* permite coletar dados relacionados a qualidade de energia afim de manter melhor desempenho e confiabilidade de instalações elétricas, através da identificação da qualidade de energia e problemas de eficiência energética de forma simples e prática através da gravação e análise de dados.

O analisador de qualidade de Energia *Fluke 1738* é projetado para aferir os parâmetros de energia trifásica mais importantes, sendo: tensão RMS, corrente RMS, eventos de tensão e corrente, variações de tensão, distorção harmônica total (DHT) de corrente e tensão, fator de potência, entre outros.

Além disso, o equipamento atende as normas IEC 61000-4-7: Classe 1, IEEE 519 (harmônicas de curta duração), IEEE 1459, Módulo 8 – PRODIST, entre outras.

3.2 Software

A fim de acessar os dados coletados pelo analisador de qualidade de energia de forma mais completa através de um computador foi utilizado o *software* complementar *Fluke Energy Analyze Plus* na versão 3.6-4. Tal *software* permitiu além de baixar os dados aferidos para processamento e arquivamento:

- Analisar os harmônicos de corrente e tensão;
- Sobrepor diferentes dados a fim de identificar e documentar alterações;
- Gerar relatórios com base em normas técnicas aplicáveis;
- Exportar dados da medição para processamento posterior usando outras ferramentas, como o *software* excel, entre outros.

Para execução do *software* o computador utilizado deve atender os seguintes requisitos expostos na tabela 8.

Tabela 8 - Requisitos do sistema

Espaço livre em disco rígido	- Mínimo de 50 MB - Recomenda-se > 10 GB para dados de medição
Memória instalada	- 1 GB no mínimo para sistemas de 32 bits - Recomenda-se \geq 2 GB para sistemas de 32 bits - Recomenda-se \geq 4 GB para sistemas de 64 bits
Monitor	- 1280x1024 (a 4:3) ou 1440x900 (a 16:10) - Recomenda-se tela larga (16:10) em resolução maior
Periférico de entrada	- Portas USB 2.0
Sistema operacional	- Windows 7 - Windows 8.x - Windows 10 (32/64-bit)

Fonte: CORPORATION (2015, p. 55).

Assim sendo, por possuir diversas ferramentas para análise de dados o *software Fluke Energy Analyze Plus* desempenhou um papel importante para o desenvolvimento desse escrito.

3.3 Estudo de caso

3.3.1 Especificação Geral da Rede Elétrica e dos SFCR do Câmpus de Palmas da UFT

O Câmpus de Palmas da Fundação Universidade Federal do Tocantins se enquadra no perfil de unidade consumidora do grupo A, recebendo energia em média tensão (13,8 kV). O fornecimento de energia é feito pela concessionária responsável pela administração do sistema de distribuição de energia de Palmas, o Grupo Energisa SA.

Por ser uma UC que recebe energia em média tensão, o ponto de entrega conta com uma cabine de medição e proteção, e o sistema de distribuição interno do câmpus é de responsabilidade da universidade. De forma geral, a rede de distribuição interna da universidade segue os mesmos parâmetros para redes urbanas seguidos pela concessionária local, contudo, ela não deixa de possuir algumas particularidades.

A rede do Câmpus possui um ponto de entrega de média tensão do qual o alimentador principal deriva em duas ramificações que utilizam transformadores de potência elevada que não se encontram em redes convencionais (ARAUJO, p. 53).

A tabela 9 traz especificações acerca dos transformadores que compõe a rede de distribuição do Câmpus.

Tabela 9 - Dados dos transformadores do Câmpus Palmas

Transformadores			
Número	Potência (kVA)	Tensão (kV)	Ligação do Transformador
1	750	13,8 / (0.38/0,22)	Δ - Y
2	750	13,8 / (0.38/0,22)	Δ - Y
3	300	13,8 / (0.38/0,22)	Δ - Y
4	300	13,8 / (0.38/0,22)	Δ - Y

Fonte: Adaptado de Araujo (2019, p. 55).

Na tabela 10, tem-se a relação de cada transformador com suas respectivas cargas conectadas em seu secundário. Nosso objeto de estudo é o sistema fotovoltaico conectado à rede presente no Bloco J e que está conectado ao transformador de número 4.

Tabela 10 - Relação dos transformadores do Câmpus Palmas com suas respectivas cargas

Transformador	Cargas
1	Blocos: 1, 2, A, B, C, D, E, F e iluminação externa.
2	Blocos: 3, 4, G, H, I; Laboratórios: I, II, III e IV; cuica e iluminação externa.
3	Restaurante Universitário (RU)
4	Bloco J

Fonte: Adaptado de Araujo (2019, p. 55).

Ademais, a tabela 11 descreve as especificações técnicas do SFCR presente no bloco.

Tabela 11 - Especificações Técnicas do SFCR do Bloco J

Transformador	Local	Quantidade de módulos	Potência de módulos (kWp)	Inversor	Potência nominal CA (kW)
4	Bloco J	88	29,04	<i>Fronius ECO 27</i>	27
		88	29,04	<i>Fronius ECO 27</i>	27
		88	29,04	<i>Fronius ECO 27</i>	27
		68	22,44	<i>Sungrow SG 20KTL - M</i>	20
Total		332	109,56	-	101

Fonte: Adaptado de Araujo (2019, p. 56).

Para mais, a tabela 12 traz as características dos inversores utilizados no SFCR.

Tabela 12 - Especificações Técnicas dos Inversores do SFCR do Bloco J

Parâmetros	<i>Fronius ECO 27</i>	<i>Sungrow SG 20KTL - M</i>
Dados de entrada		
$V_{\text{entrada-máximo}}$	1000 V	1000 V
V_{mppt}	580 – 850 V	480 – 850 V
Nº de mppt	1	2
$I_{\text{entrada-máxima}}$	47,7 A	44 A
Dados de saída		
Potência nominal CA	27 kW	20kW

$I_{\text{máxima-saída}}$	40,9 A	31,9 A
$V_{\text{saída}}$	200 – 400 V	270 – 480 V
Conexão de saída	3F + 1N + 1 PE	3F + 1N + 1 PE
Eficiência máxima	98,30 %	98,60%

Fonte: Adaptado de Araujo (2019, p. 57).

Nas tabelas 11 e 12 pode-se observar que o sistema fotovoltaico conectado à rede em questão possui uma potência de módulos de 109,56 kWp e potência nominal de 101 kW. Sendo assim, a central geradora de energia elétrica se trata de um sistema de minigeração distribuída.

3.4 Metodologia

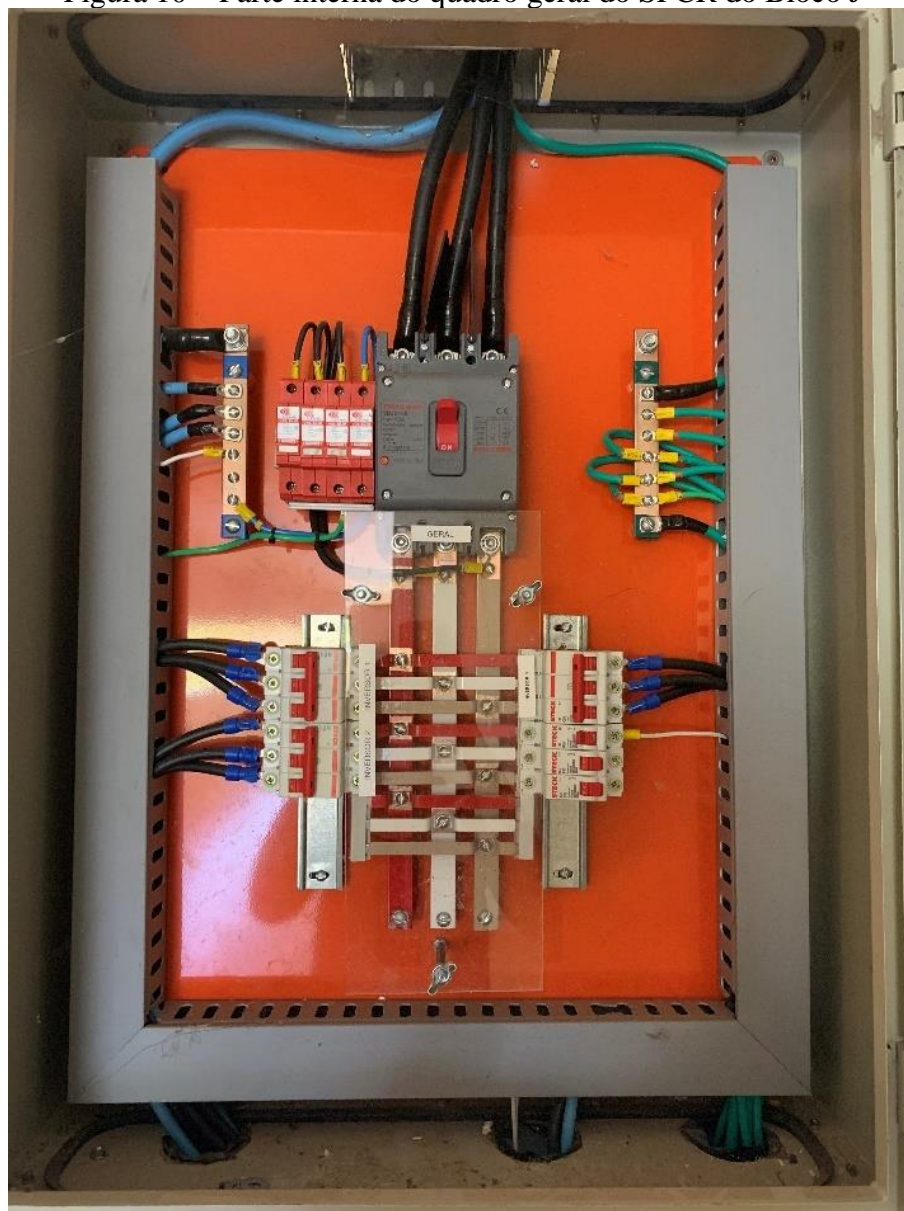
O monitoramento do sistema foi realizado durante um período de onze dias, entre 10 (dez) de junho de 2021 (dois mil e vinte e um) a 21 (vinte e um) de junho de 2021 (dois mil e vinte e um). O medidor de qualidade de energia *Fluke 1738* foi instalado no quadro geral do sistema solar do bloco J, mostrado nas figuras 9 e 10.

Figura 9 - Inversores em Funcionamento e Quadro Geral do SFCR



Fonte: Arquivo da Autora (2022).

Figura 10 – Parte interna do quadro geral do SFCR do Bloco J



Fonte: Arquivo da Autora (2022).

Conforme pode-se verificar nas Figura 9 e 10, no quadro geral onde foram realizadas as medições estavam conectados três inversores, sendo eles *Fronius ECO 27*. Assim sendo, as medições foram realizadas em uma parte do sistema de 87,12 kWp de potência de módulos e 81 kW de potência nominal.

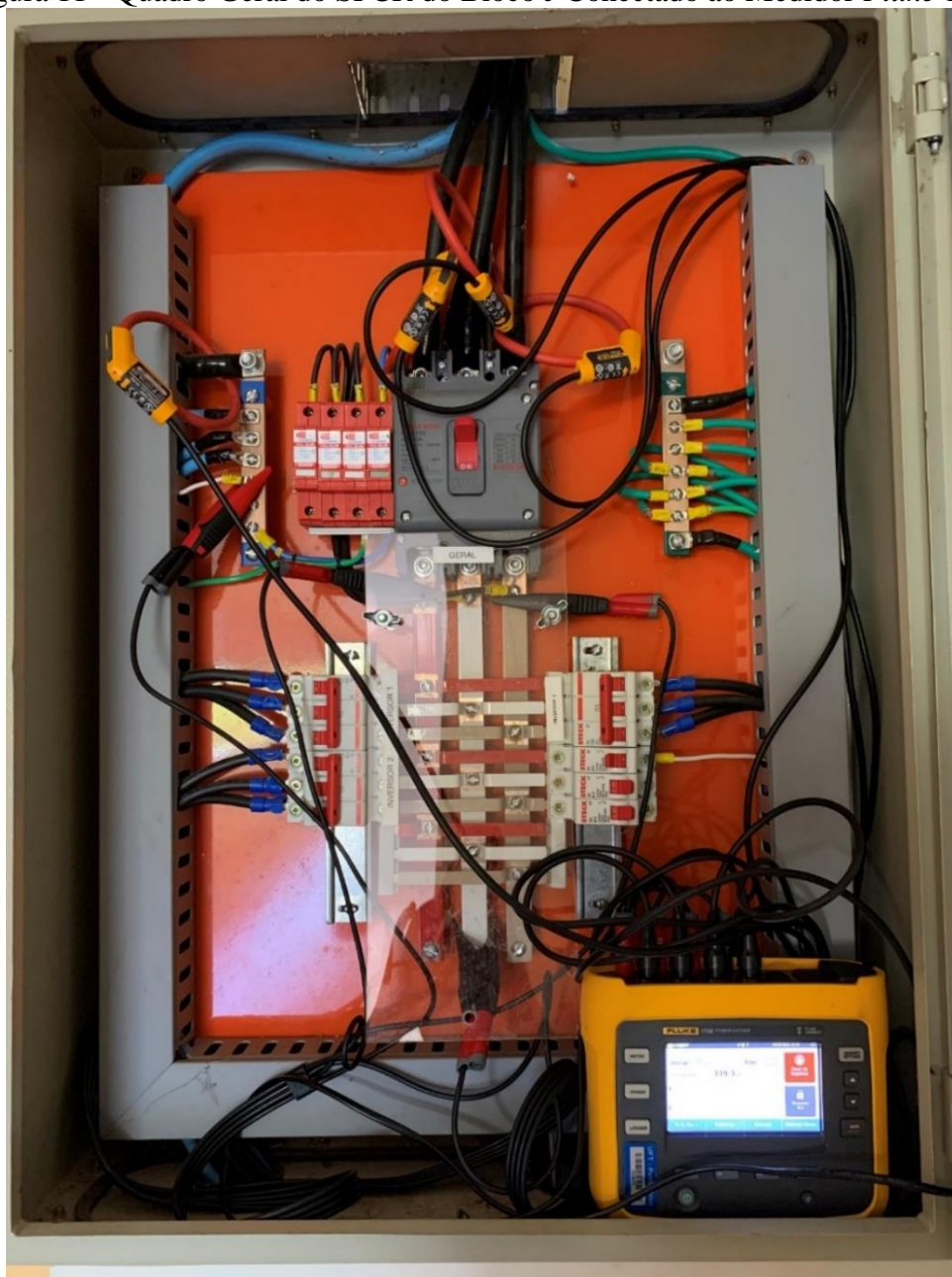
O analisador de qualidade de energia foi conectado ao quadro geral do SFCR da seguinte forma:

- Com as pontas de prova flexíveis de corrente, as entradas de medição de corrente (trifásicas + N) foram conectadas as fases e ao neutro provindos do transformador;

- Com os cabos de teste com garra de jacaré, as entradas as Entradas de medição de tensão (trifásicas + N) foram conectadas aos barramentos de fase aos quais os inversores estão conectados, e ao barramento de neutro do quadro.

A figura 11 apresenta o quadro após a realização das conexões.

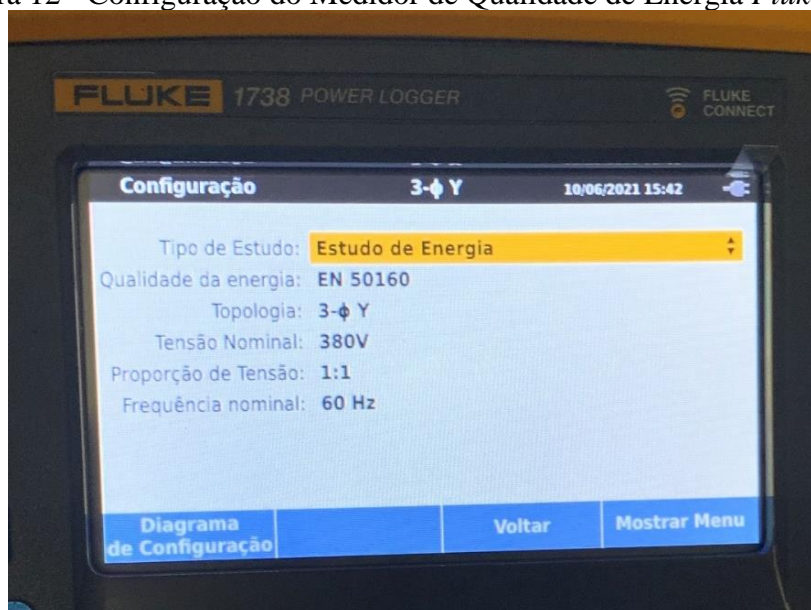
Figura 11 - Quadro Geral do SFCR do Bloco J Conectado ao Medidor *Fluke 1738*



Fonte: Arquivo da Autora (2022).

E tendo sido instalado, o medidor de qualidade de energia foi configurado conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Configuração do Medidor de Qualidade de Energia *Fluke 1738*

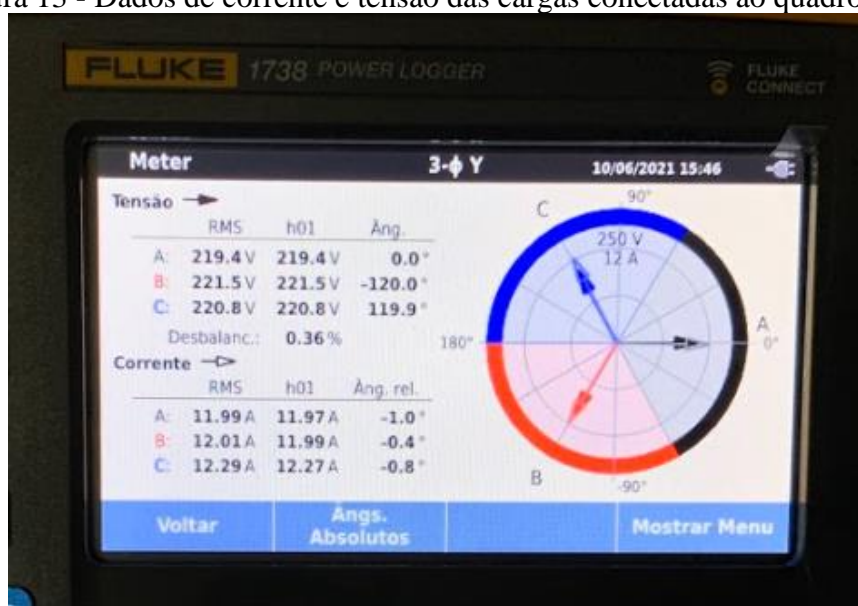


Fonte: Arquivo da Autora (2022).

O padrão de qualidade de energia utilizado como parâmetro foi a norma EN 50160, que trata das características da tensão da eletricidade fornecida por redes de distribuição públicas. Tal configuração do equipamento tem suporte para os seguintes parâmetros: Frequência; Variações de tensão; Harmônicas de tensão e THD de tensão; Desequilíbrio.

Ademais, tendo configurado o equipamento foram verificados os dados de corrente e tensão do circuito analisado, e foram obtidas as seguintes informações presentes na figura 13.

Figura 13 - Dados de corrente e tensão das cargas conectadas ao quadro geral



Fonte: Arquivo da Autora (2022).

Conforme mostrado na figura 13, as cargas conectadas ao quadro geral do sistema fotovoltaico conectado à rede estão bem distribuídas, tanto em termos de tensão quanto de corrente, apresentando desbalanceamento de tensão de apenas 0,36%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a retirada do medidor de qualidade de energia do quadro geral do SFCR, os dados foram baixados e processados através do *software Fluke Energy Analyzer Plus* - versão 3.6. Acerca do monitoramento tem-se a seguinte configuração de registro, detalhada na tabela 13.

Tabela 13 - Informações de registro do monitoramento

Nome da seção	ES.402
UUID da seção	f45ed957-07ae-485d-bcf0-ba20815099e1
Tipo de estudo	Estudo de energia
Topologia	3- ϕ Y
Tensão nominal	380 V
Frequência nominal	60 Hz
Data de início	10/06/2021 15h50min59seg
Data do final	21/06/2021 14h38min36seg
Duração	10d 22h 47m 37s
Intervalo médio	5 seg
Número médio de intervalos	189213

Fonte: Adaptado do *Software Fluke Energy Analyze Plus* (2022).

Os dados obtidos são analisados nas próximas seções.

4.1 Distorção Harmônica Total de Tensão percentual média

Tem-se que a tensão nominal do sistema é de 380 V, uma vez que o sistema está conectado no secundário do transformador. Além disso, segundo o Módulo 8 do PRODIST, para sistemas com tensão nominal abaixo 2,3 kV, o limite de distorção harmônica total de tensão (DTT95%) é de 10,0% (conforme mostrado na tabela 5).

A figura 14 apresenta as médias de DHT% de tensão por fase obtidas durante o período de monitoramento do SFCR. Conforme ilustrado, as médias lineares não ultrapassam 1,8%, o que está dentro do valor aceitável especificado no Módulo 8 da PRODIST.

Ademais, o valor máximo de DHT% de tensão registrado é de 3,5% na fase BN. Tal valor também está bem abaixo do especificado pela principal normativa nacional.

Figura 14 - Distorção Harmônica Total (DHT%) percentual média de tensão por fase

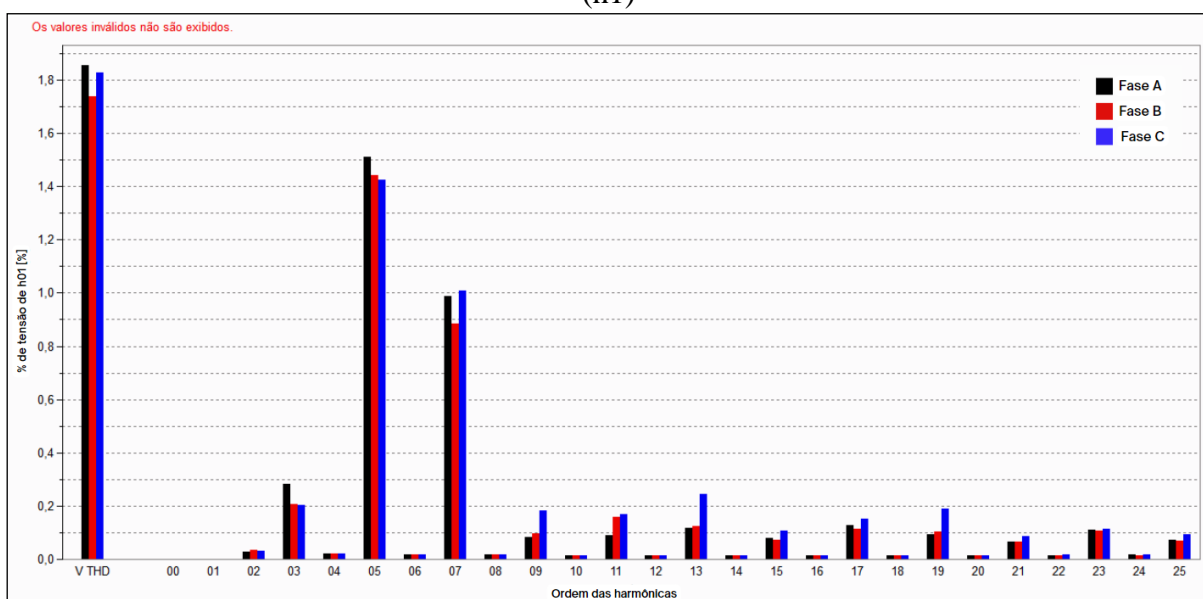
V THD [%]	AN	BN	CN
Máx.	3,1 %	3,5 %	3,1 %
	13/06/2021 07:07:30	13/06/2021 23:27:30	13/06/2021 07:07:30
Média linear	1,8 %	1,7 %	1,8 %
Mín.	1,2 %	1,1 %	1,3 %
	13/06/2021 23:41:00	13/06/2021 23:41:00	18/06/2021 14:33:05

Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

Além disso, tais valores de distorção harmônica total de tensão estão todos dentro dos limites fixados na Recomendação 519:2014 do IEEE, detalhados na Tabela 2.

Analisando os dados obtidos de forma mais detalhada, a figura 15 e a tabela 14 apresentam os valores de distorção harmônica total de tensão por harmônica em relação a componente fundamental.

Figura 15 - DHT% média de tensão por harmônica em relação a componente fundamental (h1)



Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

Tabela 14 - DHT% média de tensão por harmônica

Ordem da harmônica (h)	DHT% (em % da tensão fundamental)		
	AN	BN	CN
2	0,028	0,035	0,030
3	0,281	0,205	0,203
4	0,019	0,020	0,020

5	1,511	1,442	1,425
6	0,017	0,017	0,016
7	0,987	0,883	1,009
8	0,017	0,016	0,016
9	0,083	0,095	0,181
10	0,015	0,015	0,015
11	0,089	0,159	0,169
12	0,015	0,015	0,015
13	0,118	0,122	0,243
14	0,015	0,015	0,015
15	0,079	0,072	0,107
16	0,015	0,015	0,015
17	0,129	0,112	0,152
18	0,015	0,015	0,015
19	0,093	0,102	0,188
20	0,015	0,015	0,015
21	0,064	0,067	0,086
22	0,015	0,015	0,016
23	0,110	0,107	0,112
24	0,016	0,015	0,016
25	0,073	0,068	0,092

Fonte: Adaptado do *Software Fluke Energy Analyse Plus* (2022).

Conforme observado na figura 15 e na tabela 14 as componentes harmônicas que apresentam maior distorção são as de quinta ordem, com maior valor na fase AN de 1,511%, e a de sétima ordem, com maior valor na fase CN de 1,009%. De acordo com a tabela 5, o valor aceitável para harmônicas ímpares de sistemas com tensão nominal menor que 2,3 kV deve ser inferior a 7,5%. Logo, tais valores estão dentro do limite aceitável.

Além disso, as demais harmônicas também ficaram dentro dos padrões aceitáveis. Sendo para harmônicas ímpares o limite de DTT% de 2,5% e para harmônicas múltiplas de três DTT% de 6,5%. Os valores máximos atingidos nesses grupos foram de:

- 0,035% na fase BN na harmônica de segunda ordem;
- 0,281% na fase AN na harmônica de terceira ordem.

4.2 Distorção Harmônica Total de Corrente percentual média

A figura 16 apresenta um resumo com as médias de DHT% de corrente por fase obtidas durante o período de monitoramento do SFCR.

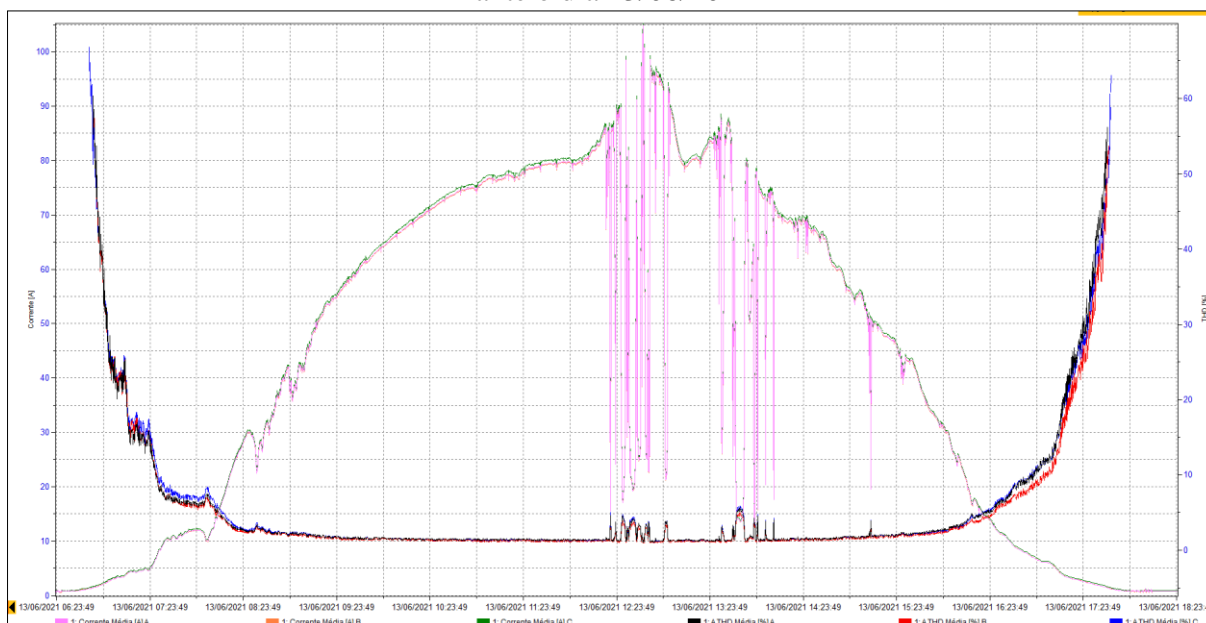
Figura 16 - Distorção Harmônica Total (DHT%) percentual média de corrente por fase

A THD [%]	A	B	C
Máx.	69,4* % 13/06/2021 06:46:35	68,4* % 13/06/2021 06:46:35	74,9* % 13/06/2021 06:44:10
Média linear	5,3** %	5,1** %	5,6** %
Mín.	0,94* % 15/06/2021 10:10:30	0,89* % 13/06/2021 12:41:45	0,90* % 15/06/2021 10:10:30

Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

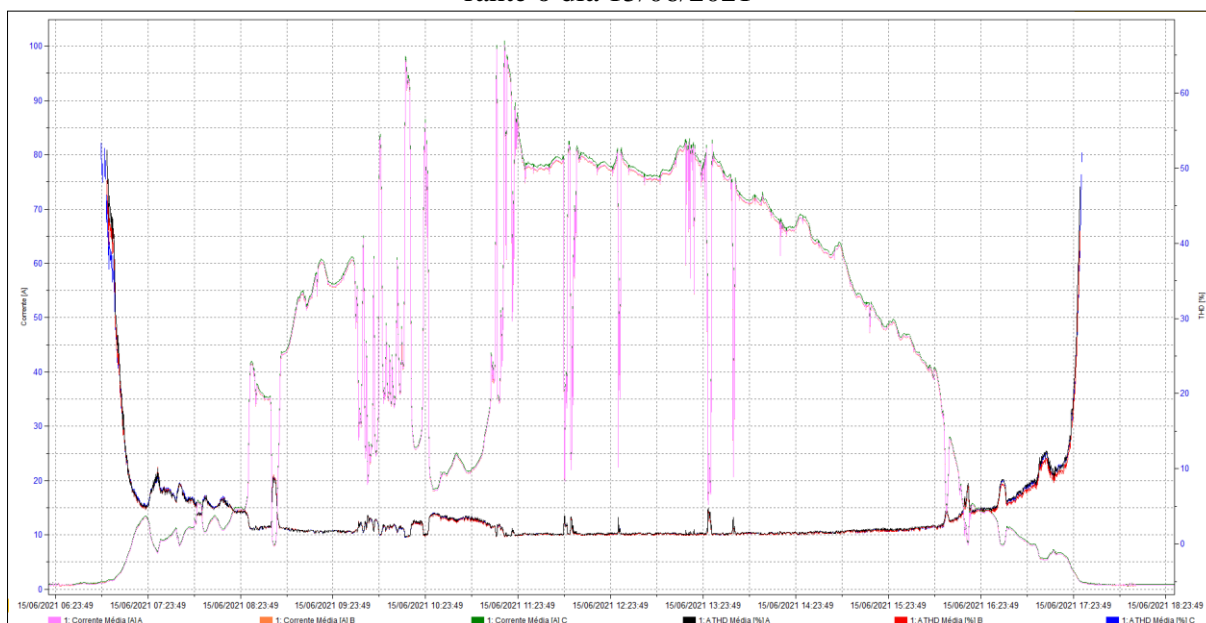
É evidente que os valores de DHT% de corrente máximos estão fora dos limites aceitáveis, contudo, ao observar esses dados nota-se que esses valores são todos registrados em horários próximos, por volta da 6 (seis) horas e 46 (quarenta e seis) minutos, no início do dia que consequentemente indicam também o momento em que o SFCR começa a geração de energia e injeção de potência na rede. Tal fato é notável nas figuras 17 e 18 que trazem os gráficos relativos a DHT% de corrente e o valor da corrente ao longo dos dias que foram registrados os valores máximos e mínimos de DHT% de corrente.

Figura 17 - Distorção Harmônica Total (DHT%) de corrente por fase e corrente por fase durante o dia 13/06/2021



Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

Figura 18 - Distorção Harmônica Total (DHT%) de corrente por fase e corrente por fase durante o dia 15/06/2021



Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

Na tabela 15 tem-se os dados relativos aos valores de DHT% de corrente, e a corrente, nas datas e horários que foram registrados os valores máximos e mínimos de distorção harmônica total de corrente.

Tabela 15 – Relação de DHT% de corrente com corrente

Data	Hora	Fase	Corrente (A)	DHT-I (%)
13/06/2021	6h44min10seg	A	1,20	-
		B	1,20	-
		C	1,40	74,9
13/06/2021	6h46min35seg	A	1,40	69,4
		B	1,42	68,4
		C	1,60	61,9
13/06/2021	12h41min45seg	A	100,8	1,07
		B	100,7	0,89
		C	101,6	0,97
15/06/2021	10h10min30seg	A	95,3	0,94
		B	95,2	0,93
		C	96,1	0,90

Fonte: Adaptado do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

Assim sendo, esses valores elevados são justificáveis pois, quando a usina fotovoltaica está sem geração os valores de DHT de corrente ficam elevados pois a corrente fundamental do SFCR é extremamente baixa. Então, quando o sistema entra em operação, esse valor de corrente aumenta, e os valores de distorção harmônica diminuem e ficam dentro dos limites (MONTEIRO JÚNIOR, 2014, p. 93).

Como pode ser observado nas figuras 17 e 18 e com base nos valores apresentados na tabela 15, no horário em que a geração de energia por parte da usina fotovoltaica está iniciando e a corrente está consideravelmente baixa, temos DHT% de correntes altas. Contudo, conforme a corrente do SFCR aumenta os valores de DHT% caem consideravelmente, até estabilizarem em uma faixa de valores menor que 5%.

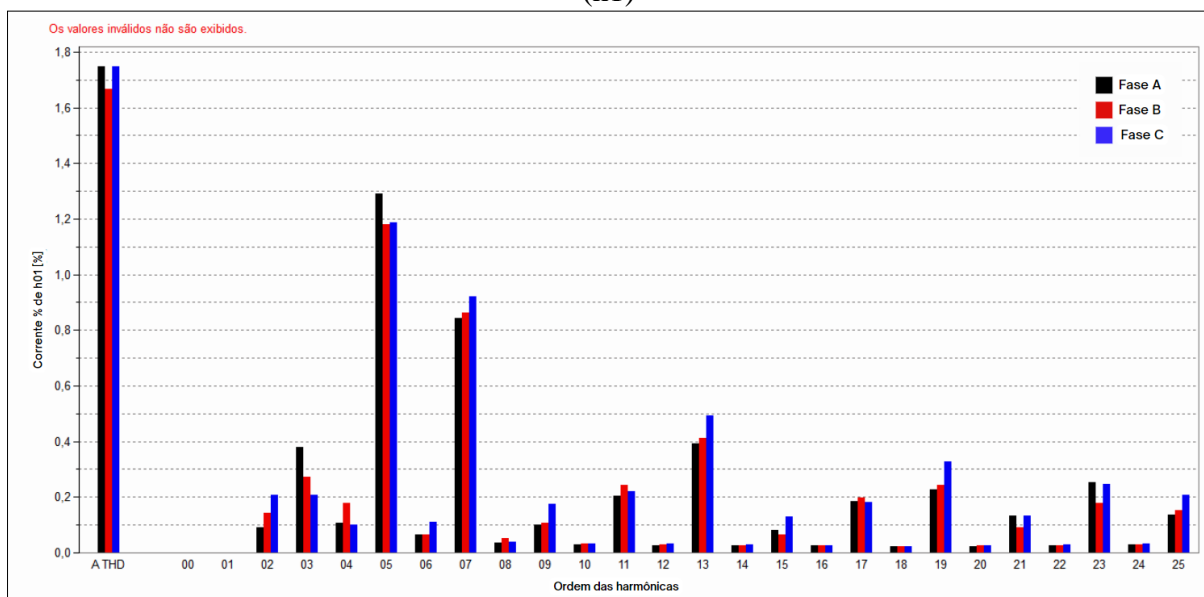
De acordo com a IEC 61727 a distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5% na saída do inversor analisado, então no momento que o inversor estabiliza a geração de energia ele se mantém dentro do limite aceitável pela norma IEC 61727. Os valores de DHT% de corrente só aumentam novamente quando a corrente da usina começa a diminuir, o que ocorre quando a geração de energia do SFCR põe-se a diminuir no fim da tarde, conforme pode ser observado nas figuras 17 e 18.

De toda forma, mesmo que as DHT% de corrente em alguns períodos apresentem um alto valor, pelo fato de a corrente da usina nesses momentos ser pequena, esse alto nível de distorção harmônica de corrente não é impactante para o sistema de distribuição uma vez que essa corrente injetada na rede tem um valor irrisório.

Ademais, os dados de distorção harmônica de corrente em horários em que a usina fotovoltaica não está em operação são descartados pelo medidor, contudo, os dados relativos ao início e fim do período de geração de energia refletiram na média linear aferida. Com isso, a análise de distorção de corrente deve ser feita de forma mais detalhada para que assim seja considerada mais confiável.

A figura 19 e a tabela 16 apresentam os valores de distorção harmônica total de corrente por harmônica em relação a componente fundamental.

Figura 19 - DHT% média de corrente por harmônica em relação a componente fundamental (h1)



Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

Conforme o gráfico da figura 19 a DHT de corrente total dos três inversores é inferior a 1,8%, sendo assim, os equipamentos estão funcionando dentro do padrão esperado.

Tabela 16 - DHT% média de corrente por harmônica

Ordem da harmônica (h)	DHT% (em % da corrente fundamental)		
	AN	BN	CN
2	0,089	0,143	0,207
3	0,378	0,271	0,209
4	0,108	0,178	0,102
5	1,290	1,180	1,185
6	0,065	0,064	0,112
7	0,842	0,864	0,920
8	0,035	0,051	0,038
9	0,102	0,107	0,176
10	0,029	0,032	0,032
11	0,205	0,243	0,222
12	0,025	0,030	0,034
13	0,392	0,413	0,492
14	0,027	0,025	0,028
15	0,081	0,065	0,130
16	0,027	0,027	0,026

17	0,185	0,197	0,183
18	0,021	0,022	0,021
19	0,228	0,244	0,327
20	0,021	0,024	0,025
21	0,133	0,091	0,133
22	0,026	0,026	0,029
23	0,254	0,179	0,245
24	0,029	0,029	0,032
25	0,137	0,152	0,207

Fonte: Adaptado do *Software Fluke Energy Analyse Plus* (2022).

Ao analisar as componentes harmônicas e o nível de distorção harmônica total de corrente de cada uma, temos que as de maior ordem são as de quinta, sétima e décima terceira ordem, respectivamente.

Conforme especificado pela IEC 61727, componentes harmônicas de terceira a nona ordem devem ter DHT% de corrente inferior a 4% e, as de décima primeira a décima quinta ordem, devem estar abaixo de 2% (tabela 4).

Assim sendo, pode-se afirmar que as componentes harmônicas com maior DHT% estão dentro dos níveis especificados pela norma com valores entre 1,290% a 0,392%, assim como as demais componentes harmônicas.

4.3 Análise de Distorção Harmônica Total durante um dia

A fim de analisar os níveis de distorção de forma mais detalhada foi realizado um recorte de dados do período de um dia, tendo sido escolhido como referência o dia 16 (dezesesseis) de junho de 2021 (dois mil e vinte e um). Acerca desse período monitoramento tem-se a seguinte configuração de registro, detalhada na tabela 17.

Tabela 17 - Informações de registro do monitoramento diário de 16/06/2021

Tipo de estudo	Estudo de energia
Topologia	3- ϕ Y
Data de início	16/06/2021 00h00min00seg
Data do final	17/06/2021 00h00min00seg
Duração	1d 00h 00m 00s

Intervalo médio	5 seg
Número médio de intervalos	17280

Fonte: Adaptado do *Software Fluke Energy Analyse Plus* (2022).

4.3.1 Distorção Harmônica Total de Tensão percentual média durante um dia

A figura 20 traz os dados de DHT média de tensão por fase durante o período de um dia.

Figura 20 - Distorção Harmônica Total (DHT%) percentual média de tensão por fase ao decorrer do dia 16/06/2021

V THD [%]	AN	BN	CN
Máx.	2,5 % 16/06/2021 06:34:10	2,2 % 16/06/2021 06:34:45	2,4 % 16/06/2021 06:30:15
Média linear	1,9 %	1,7 %	1,8 %
Min.	1,5 % 16/06/2021 23:29:55	1,3 % 16/06/2021 23:37:40	1,4 % 16/06/2021 23:37:40

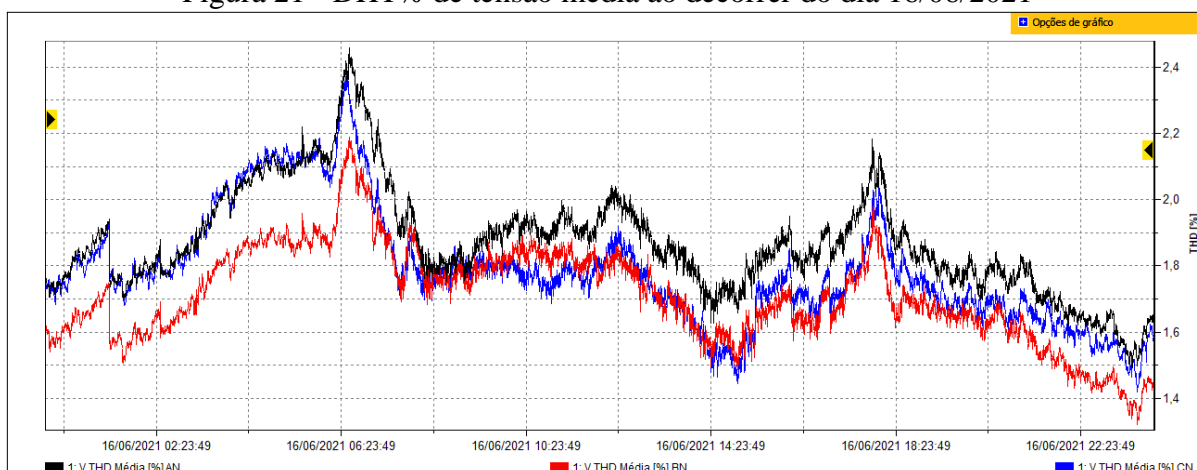
Fonte: *PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus* (2022).

Observando a figura 20 e comparando com os dados da figura 14, que traz os dados de todo o período de monitoramento, nota-se que as médias lineares de distorção harmônica de tensão por fase não sofreram grandes alterações.

Em relação aos valores mínimos e máximos de DHT% percebe-se que houveram alterações nos valores. Os valores mínimos da amostragem diária aumentaram um pouco, com valores de 0,1% até 0,3% em cada fases, em relação a amostra total. Contudo, os valores máximos da amostragem diária apresentaram uma diminuição quando comparados em relação aos dados da amostra total. O que era esperado uma vez que os valores máximos e mínimos da figura 14 referem-se a outras datas.

A figura 21 traz o gráfico que relaciona os valores médios de DHT% por fase de acordo com a data e horário escolhidos.

Figura 21 - DHT% de tensão média ao decorrer do dia 16/06/2021



Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

De acordo com as figuras 20 e 21, o momento com maior distorção harmônica é no início do dia, momento esse em que o sistema está iniciando a geração de energia e começa a injetar potência na rede.

4.3.2 Distorção Harmônica Total de Corrente percentual média durante um dia

Observando a figura 22 e comparando com as informações da figura 16, que traz os dados referentes a todo o período de monitoramento, nota-se que as médias lineares de distorção harmônica de corrente por fase não sofreram grandes alterações e que houve uma diminuição nos níveis de distorção máxima.

Figura 22 - Distorção Harmônica Total (DHT%) percentual média de corrente por fase ao decorrer do dia 16/06/2021

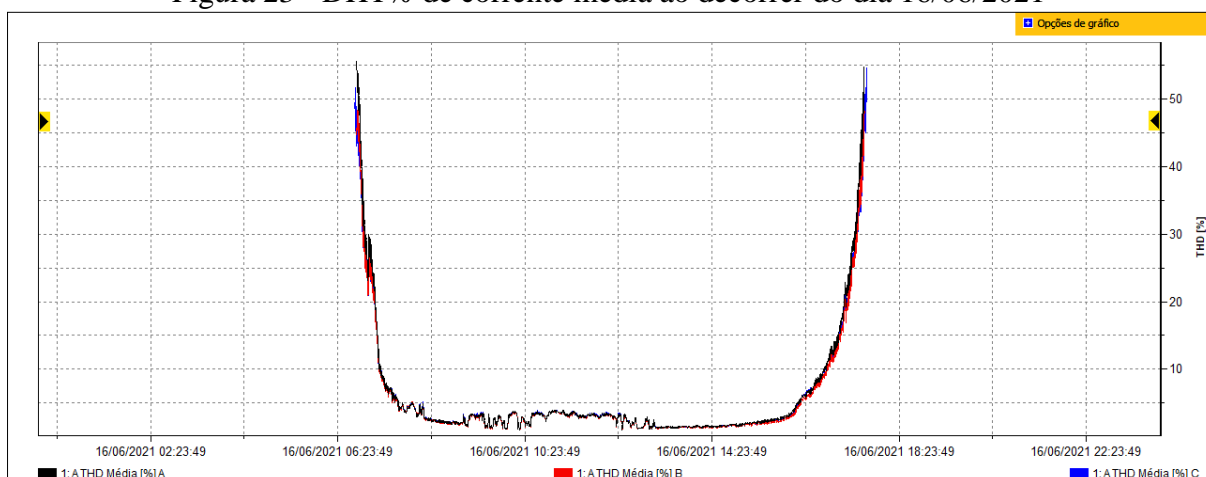
A THD [%]	A	B	C
Máx.	61,3* % 16/06/2021 06:47:35	55,3* % 16/06/2021 06:47:30	65,5* % 16/06/2021 06:43:05
Média linear	5,8** %	5,4** %	5,8** %
Mín.	1,0* % 16/06/2021 12:28:35	0,95* % 16/06/2021 12:28:35	1,00* % 16/06/2021 12:28:35

Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

Contudo, os níveis de distorção máxima continuam altos e eles também foram registrados em um horário que indica o início de injeção de energia dos inversores na rede, o que influencia diretamente os valores da média linear que também continuam altos.

Na figura 23 tem-se o gráfico que relaciona a DHT% de corrente por fase ao longo de um dia.

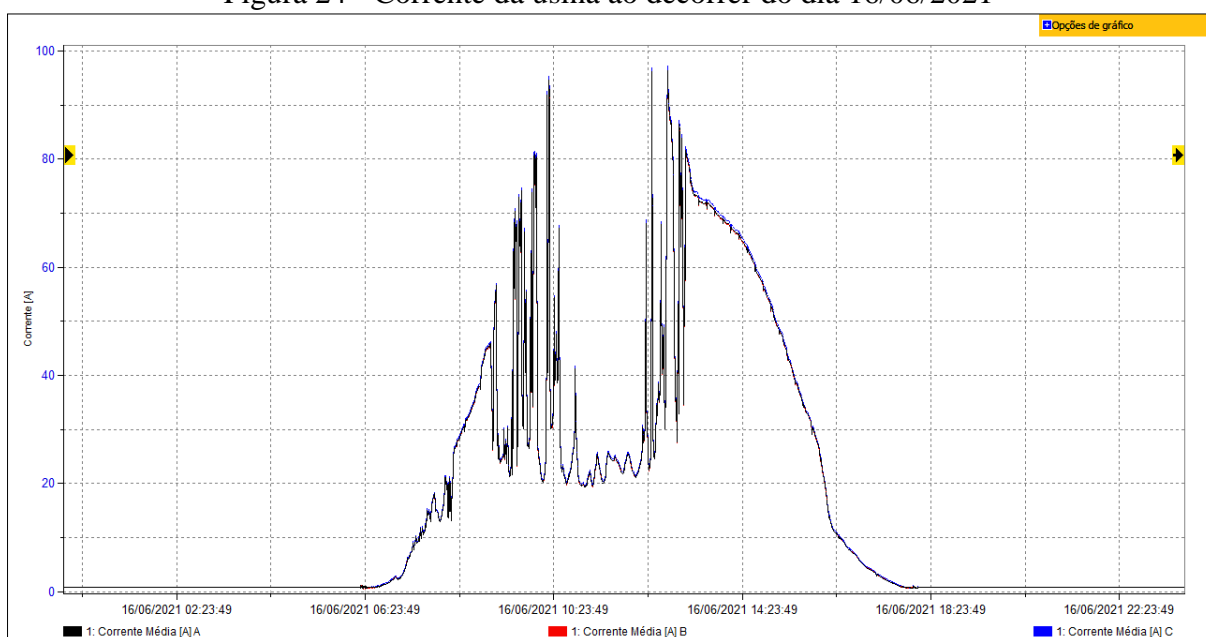
Figura 23 - DHT% de corrente média ao decorrer do dia 16/06/2021



Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

Na figura 24 tem-se o gráfico da corrente por fase ao longo de um dia. Em seguida, os dados acerca dos valores máximos e mínimos de DHT% de corrente registrados, e o valor da corrente nesses momentos são apresentados na tabela 18.

Figura 24 - Corrente da usina ao decorrer do dia 16/06/2021



Fonte: PrintScreen do Software Fluke Energy Analyse Plus (2022).

Tabela 18 – Relação de DHT% de corrente com corrente do dia 16/06/2021

Hora	Fase	Corrente (A)	DHT-I (%)
6h43min5seg	A	1,00	-
	B	1,00	-
	C	1,20	65,5

6h47min30seg	A	1,30	-
	B	1,40	55,3
	C	1,50	48,3
6h47min35seg	A	1,40	-
	B	1,40	-
	C	1,60	61,3
12h28min35seg	A	96,00	1,00
	B	95,80	0,95
	C	96,70	1,00

Fonte: Adaptado do *Software Fluke Energy Analyse Plus* (2022).

Analisando o gráfico da figura 23 é possível observar que antes das seis horas da manhã e depois das seis horas da tarde não há registro da DHT% média de corrente, isso ocorre para evitar que sejam registrados um grande volume de dados não confiáveis, pois como citado anteriormente em momentos de não geração, os valores de DHT% de corrente ficam elevados devido à corrente fundamental da usina ser extremamente baixa (como pode ser observado na figura 24).

Porém, observando as figuras 23 e 24, é possível observar no momento de início da geração de energia da usina que conforme a produção de energia e o valor da corrente da usina fotovoltaica aumenta, esses valores de DHT% de corrente reduzem e ficam com valores dentro dos limites, abaixo de 5% de acordo com a IEC 61727.

Ademais, observando a figura 24 e a tabela 18, nota-se que os valores altos de DHT% de corrente estão relacionados a valores muito baixos de corrente. Sendo que, no momento em que foi registrado o maior valor de distorção harmônica de corrente (às 6 horas e 43 minutos da manhã, na fase C) a corrente registrada na fase era de apenas 1,20 A. Assim sendo, mesmo possuindo um DHT% alto no momento, a corrente injetada na rede de distribuição não traz impacto à rede devido ao seu valor reduzido.

5 CONCLUSÃO

Ao longo dos últimos anos o uso crescente de fontes renováveis de energia tem levado ao desenvolvimento e à diversificação da matriz energética brasileira. Entre as fontes de energia limpa disponíveis no mercado a energia solar fotovoltaica tem tido grande destaque, tendo conseguido se estabelecer como uma fonte de energia acessível, confiável e vantajosa.

A disseminação dos sistemas de geração fotovoltaica está diretamente associada ao desenvolvimento da Geração Distribuída (GD) que traz uma nova abordagem à forma de geração e consumo de energia elétrica. A GD transforma o fluxo de potência unidirecional tradicional dos sistemas elétricos em um fluxo de potência bidirecional com geração descentralizada.

Os sistemas de geração distribuída se caracterizam por possuir potência reduzida e ficarem alocados próximos ao centro de consumo, não necessitando de extensas redes de transmissão. Contudo, essas centrais geradoras devem obedecer a parâmetros e normas para garantir a qualidade da energia que será injetada no sistema de distribuição. Esses parâmetros de qualidade de energia tratam de características como forma de onda, amplitude e nível de distorção harmônica, entre outros.

Acerca de distorções harmônicas, os sistemas fotovoltaicos são classificados como uma das principais fontes de harmônicas em sistemas elétricos. Isso se deve a um equipamento fundamental aos sistemas de geração fotovoltaica, o inversor, este é um exemplo clássico de carga não linear por ser formado por dispositivos eletrônicos como IGBTs e MOSFETs. Sendo responsável por produzir quantias baixas de harmônicas (devido ao uso de técnicas de modulação por largura de pulso), mas de forma diversificada. Desta forma, fica evidente a importância da análise de distorção harmônica de uma usina fotovoltaica conectada à rede.

Assim sendo, este escrito analisa a qualidade de energia da rede de distribuição, com usina fotovoltaica, do Câmpus de Palmas da Universidade Federal do Tocantins, mediante estudo da injeção de harmônicos em uma ramificação do sistema de distribuição por meio de inversores fotovoltaicos.

A ramificação escolhida para esse estudo de caso está localizada no Bloco J do Câmpus de Palmas da UFT. Está conectada a um transformador de 300 kVA, com tensão de 13,8 kV e conexão do tipo delta-estrela. Tendo o SFCR conectado à ramificação uma potência de placa de 109,56 kWp e potência nominal de 101 kW. Porém, o monitoramento foi feito em três dos quatro inversores do sistema, correspondente a uma potência de 87,12 kWp de potência de módulos e 81 kW de potência nominal.

Para o monitoramento foi utilizado o medidor de qualidade de energia *Fluke 1738*, configurado com o padrão de qualidade de energia da norma EN 50160. Tal configuração do equipamento tem suporte para os seguintes parâmetros: frequência; variações de tensão; harmônicas de tensão e THD de tensão; desequilíbrio. Tendo finalizado o monitoramento, os dados foram baixados e processados através do software *Fluke Energy Analyzer Plus* – versão 3.6.

Acerca dos níveis de Distorção Harmônica Total (DHT) de tensão, foi obtido uma média linear por fase com valores de 1,7% para fase BN e 1,8% para as fases AN e CN, valores esses dentro dos limites determinados pelas principais normativas: módulo 8 do PRODIST, NP EN 50160 e Recomendação 519:2014 do IEEE. Além disso, os valores médios máximos de DHT de tensão obtidos e as DHT de tensão médias das ordens de harmônicas também estão dentro dos limites permitidos.

Ademais, ao analisar a DHT média de tensão por fase ao longo de um dia (sendo o dia 16/06/2021), nota-se que as médias lineares de distorção harmônica de tensão por fase não sofreram grandes alterações e continuam dentro dos limites permitidos.

Para análise dos níveis de Distorção Harmônica Total (DHT) de corrente fora necessário fazer uma análise de forma mais detalhada uma vez que os dados médios aferidos apresentaram grandes alterações. Essas foram ocasionadas devido ao período de monitoramento das harmônicas de corrente, uma vez que valores muito altos foram registrados nos primeiros horários do dia, ou seja, nas primeiras horas de monitoramento.

Tais alterações são justificáveis pois no momento em que a geração de energia por parte da usina fotovoltaica está iniciando, a corrente fundamental do SFCR é extremamente baixa o que faz com que os valores de DHT de corrente sejam elevados. Então, conforme o sistema entra em operação, esse valor de corrente aumenta, e os valores de distorção harmônica diminuem e ficam dentro dos limites. Contudo, esses valores iniciais altos refletiram na média linear aferida.

Contudo, analisando a Distorção Harmônica Total (DHT) de corrente e os valores das ordens harmônicas, de forma mais detalhada e tendo como parâmetros a recomendação da norma IEC 61727, foi possível concluir que a USF do Câmpus de Palmas da UFT está injetando harmônicos de corrente dentro dos limites permitidos.

Posteriormente, ao verificar a DHT média de corrente por fase ao longo do dia 16/06/2021, foi possível identificar novamente as alterações causadas pelos valores obtidos ao início e ao final do dia de monitoramento. Porém, é possível observar na figura 23 que conforme a produção de energia e o valor da corrente da usina fotovoltaica aumenta, esses valo-

res de DHT% de corrente reduzem e ficam com valores dentro dos limites, abaixo de 5% de acordo com a IEC 61727, e só aumentam novamente quando a geração volta a cair ao fim do dia.

Assim sendo, pode-se afirmar que a ramificação presente no Bloco J, da usina fotovoltaica do Câmpus de Palmas da Universidade Federal do Tocantins está operando dentro dos principais padrões estabelecidos no que se refere a injeção de harmônicas na rede de distribuição.

Por fim, com base no trabalho desenvolvido, é possível identificar alguns temas que podem ser tratados em trabalhos futuros, como:

- Análise das distorções harmônicas em outras ramificações da usina solar fotovoltaica do Câmpus de Palmas;
- Análise de distorções harmônicas provindas de todos os sistemas fotovoltaicos que compõem a usina e o impacto deles na rede de distribuição;
- Estudo do impacto da inserção da usina solar fotovoltaica do Câmpus de Palmas em outros indicadores de qualidade de energia apresentados no módulo 8 do PRODIST.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade do fornecimento de energia elétrica.** 13 ed. [S.L.]: ANEEL, 2022. 69 p. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: 3 jun. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição.** 7 ed. [S.L.]: ANEEL, 2017. 74 p. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99. Acesso em: 12 fev. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº. 482/2012.** Condições gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. ANEEL, 2012.

ARAUJO, Lucas Cajueiro. **Análise dos impactos da implantação da usina solar fotovoltaica na Universidade Federal do Tocantins – UFT Câmpus Palmas.** 99 f. Monografia (Graduação) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/1479/1/Lucas%20Cajueiro%20Araujo%20-%20TCC%20Monografia%20-%20Engenharia%20El%C3%A9trica.pdf>. Acesso em: 20 maio 2022.

BARBOSA, Maria de Fátima Lacerda. **Avaliação Probabilística do Impacto da Microgeração Fotovoltaica Distribuída em Redes de Distribuição de Energia Elétrica.** 2018. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10024791.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2021.

BRASIL. ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA).** Disponível em: <https://bit.ly/2IGf4Q0>. Acesso em: 30 jun. 2022.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balço Energético Nacional: Relatório Síntese 2022 / Ano Base 2021.** Ministério de Minas e Energia – MME, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 29 jun. 2022.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. 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); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 6 jan. 2022.**

CAMARGO, Lucas Tamanini. **Projeto de Sistemas Fotovoltaicos conectados à Rede Elétrica.** 2017. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Lon-

drina, 2017. Disponível em:

http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2017_LucasTamaniniCamargo.pdf. Acesso em: 20 mar. 2021.

CASTRO, Felipe de Carvalho. **Distorção Harmônica de Corrente Produzida por Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO ELETROTÉCNICA. **NP EN 50160: Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia elétrica**. 2001. 22 p.

CORPORATION, Fluke. **Manual do Usuário: 1736/1738 Power Logger**. 2015. Rev. 2, 1/20 (Português). Disponível em: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/173x_____umpor0200_0.pdf?8IIHIAcesMQMNkOdMRgnxgiJz_ilaX2H. Acesso em: 12 jul. 2021.

ENERGÊS. **O Que É Geração Distribuída**. 2020. Disponível em:

<https://energes.com.br/fale-energes/o-que-e-geracao-distribuida/>. Acesso em: 18 mar. 2021.

FLUKE. **Registradores de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 1736 e 1738**. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analísadores-da-qualidade-de-energia/1736-1738>. Acesso em: 12 jul. 2021.

FONTÃO, Marcelo Luiz. **Análise da Qualidade de Energia em Sistema Fotovoltaico em Operação Paralela com a Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. 2017. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2017. Disponível em:

<https://www.riuni.unisul.br/bitstream/handle/12345/3942/TCC%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 mar. 2021.

GOOGLE MAPS. **Localização do Câmpus Palmas da UFT**. 2022. Disponível em:

<https://www.google.com.br/maps/@-10.180025,-48.3599523,1072a,35y,270h/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 20 maio 2022.

IEEE STDTM 519. **Recommend Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, 2014.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Prioridades para a integração das fontes renováveis variáveis no sistema elétrico**. São Paulo: 2016. 41 p. Disponível em:

http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/01/NT_integracao_final.pdf. Acesso em: 30 jun. 2022.

International Electrotechnical Commission – IEC. **IEC 61727: Photovoltaic (PV) Systems – Characteristics of the Utility Interface**. 2 ed. December 2004.

LOPES, Yona; FERNANDES, Natalia Castro; MUCHALUAT-SAADE, Débora Christina. **Geração Distribuída de Energia: Desafios e Perspectivas em Redes de Comunicação**. 2015. Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense,

Niterói, 2015. Cap. 2. Disponível em: <https://sbrc2015.ufes.br/wp-content/uploads/Ch2.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2021.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 3. ed. [S.L.]: Editora Érica, 2009. 144 p.

MONTEIRO JÚNIOR, Alcy. **Modelagem da Usina Fotovoltaica do Estádio do Mineirão para Estudos de Propagação Harmônica**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

NOVELIN, Isabelle Thais. **Comportamento Harmônico de Inversores de Frequência**. 2017. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10046/1/CT_COELE_2017_2_15.pdf. Acesso em: 20 mar. 2021.

PEREIRA, Prof. Heverton Augusto. **Aula 11 – Harmônicos: regulamentos e normas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa - UFV, s.d.. Color. Disponível em: http://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula11_ELT428-%E2%80%93Harm%C3%B4nicos-regulamentos-e-normas.pdf. Acesso em: 12 mar. 2021.

PITOMBO, Sérgio Oliveira. **Proteção adaptativa anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos**. 2010. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-10082010-141050/publico/Pitombo.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2022.

ROCHA, Professor Joaquim Eloir. **Qualidade de Energia Elétrica**. Curitiba: 2016. 37 p. UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná / Departamento de Eletrotécnica. Disponível em: https://www.protcom.net/Literatura/Medicao/Qualidade/NOTAS%20DE%20AULA/NOTAS%20DE%20AULA_QUALIDADE%20ENERGIA%20EL%C3%89TRICA.pdf. Acesso em: 19 mar. 2021.