



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ DE ANCHIETA FILHO

Trabalho de Conclusão de Curso

AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM INVERSOR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

CAMPINA GRANDE – PB
FEVEREIRO DE 2023

JOSÉ DE ANCHIETA FILHO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:
AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
DE UM INVERSOR FOTOVOLTAICO CONECTADO À
REDE

*Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Célio Anésio da Silva, D.Sc.

Professor Orientador

CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO DE 2023

JOSÉ DE ANCHIETA FILHO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
DE UM INVERSOR FOTOVOLTAICO CONECTADO À
REDE

*Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Aprovado em

Jalberth Fernandes de Araújo, D.Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Professor Convidado

Célio Anésio da Silva, D.Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Professor Orientador

CAMPINA GRANDE - PB

FEVEREIRO DE 2023

AGRADECIMENTOS

A Deus, agradeço por ter concedido o dom da vida e por ter dado o dom da sabedoria e a coragem e iluminando meu caminho.

Aos meus pais, José de Anchieta (*in memoriam*) e Lúcia Maria Pinheiro, agradeço os ensinamentos, o carinho e apoio em todos os momentos da minha vida, nos momentos alegria ou de fraqueza.

A minha irmã Marta Maria Pinheiro, agradeço pelas palavras de conforto e motivação para continuar a trilhar meu caminho e aos cartões e sermões proferidos agradeço por ter mim colocado nos trilhos e dado a confiança de que posso conquistar todos meus sonhos.

Aos meus amigos, agradeço por sempre estarem por perto, outros nem tanto por motivos compreensíveis, mas nem por isso deixaram de estar presente para compartilhar meus momentos de alegria e tristezas e sua paciência para escutar meus desabafos.

Ao meu orientador, Célio Anésio da Silva, agradeço pelo conhecimento e a colaboração indispensável para realizar este trabalho.

Aos meus professores, agradeço todo o conhecimento e a amizade adquirido nesses anos de curso e fiquem sabendo que não será em vão.

A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), agradeço o espaço concedido para realização deste trabalho, agradeço a todos nesta instituição que de alguma maneira contribuiu para minha formação.

A todas as amizades construídas durante o curso e que são realmente amizades para vida toda, a UFCG meu muito obrigado!

RESUMO

A crescente utilização de fontes de energia renováveis em detrimento ao uso de fontes não renováveis revela uma consolidada preocupação ambiental com a emissão dos gases do efeito estufa e o agravamento do aquecimento global. Diante disto, a matriz energética brasileira possui uma expressiva participação de fontes renováveis de energia. A energia solar fotovoltaica é uma modalidade de energia que está amplamente difundida com uma taxa de crescimento anual de aproximadamente 15% e o Brasil é favorecido por apresentar características geográficas e a baixa variabilidade da irradiação solar. Um exemplo deste tipo de geração são os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR). Neste caso, os inversores de frequência são utilizados para realizar a interface com a rede elétrica. Contudo, os inversores fotovoltaicos possuem seu funcionamento baseado na eletrônica de potência, no qual é caracterizada por apresentarem dispositivos com comportamento não – lineares. Com isso, o crescimento dos SFCR podem degradar gradativamente a Qualidade de Energia Elétrica nos sistemas de distribuição. Por isso, o presente trabalho possui como objetivo principal realizar uma avaliação da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) de um inversor fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição. Entre os parâmetros analisados destacam-se distorção harmônica na rede, desequilíbrio de tensão e flutuações de tensão. Os resultados obtidos durante o monitoramento foram comparados com a norma Módulo 8 – PRODIST que trata da qualidade de energia elétrica. Nota-se nos resultados obtidos na pesquisa que a distorção harmônica total de tensão permaneceu abaixo 10%, os valores de distorção harmônica de tensão das componentes pares e ímpares não múltiplas de 3, como também, as componentes harmônicas múltiplas de 3, obtiveram valores inferiores, respectivamente, 2%, 7,5% e 6,5%. Já os valores de desequilíbrio de tensão permaneceram abaixo de 3% e a flutuação de tensão mostrou-se abaixo 1 pu. Nota-se que os inversores de frequência possibilitam uma redução na distorção harmônica de tensão.

Palavras – chaves: Inversor de frequência; Qualidade de Energia Elétrica; Distorções harmônicas; Desequilíbrio de tensão.

ABSTRACT

The growing use of renewable energy sources to the detriment of the use of non-renewable sources reveals a consolidated environmental concern with the emission of greenhouse gases and the worsening of global warming. Given this, the Brazilian energy matrix has a significant share of renewable energy sources. Photovoltaic solar energy is a form of energy that is widely disseminated with an annual growth rate of approximately 15% and Brazil is favored due to its geographical characteristics and low variability of solar irradiation. An example of this type of generation are grid-connected photovoltaic systems (SFCR). In this case, frequency inverters are used to interface with the power grid. However, photovoltaic inverters have their operation based on power electronics, which is characterized by having devices with non-linear behavior. As a result, the growth of SFCR can gradually degrade the Electric Power Quality in the distribution systems. Therefore, the present work has as main objective to carry out an evaluation of the Electric Power Quality (PQ) of a photovoltaic inverter connected to the electrical distribution grid. Among the analyzed parameters, harmonic distortion in the network, voltage unbalance and voltage fluctuations stand out. The results obtained during the monitoring were compared with the Module 8 – PRODIST standard, which deals with the quality of electrical energy. It is noted in the results obtained in the research that the total voltage harmonic distortion remained below 10%, the voltage harmonic distortion values of the even and odd components not multiples of 3, as well as the harmonic components multiples of 3, obtained lower values, respectively, 2%, 7.5% and 6.5%. The voltage unbalance values remained below 3% and the voltage fluctuation was below 1 pu. Note that frequency inverters allow a reduction in voltage harmonic distortion.

Keywords: Frequency inverter; Electric Power Quality; Harmonic distortions; Voltage imbalance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Células fotovoltaicas compostas por silício monocristalino e silício policristalino.....	19
Figura 02: String box.	21
Figura 03: Decomposição de um sinal distorcido em suas 3 primeiras componentes ímpares.	23
Figura 04: Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação.	27
Figura 05: Inversor de frequência instalado no LSP.....	29
Figura 06: Painel frontal do qualímetro NEXUS – 1500+.	30
Figura 07: Estrutura básica do inversor fotovoltaico.....	31
Figura 08: Tela inicial do Communication EXT™.	33
Figura 09: Tela Log Statistics	34
Figura 10: Distorção harmônica total na fase 01.	35
Figura 11: Distorção harmônica total na fase 02.	36
Figura 12: Distorção harmônica total na fase 03.	36
Figura 13: Distorção harmônica total dos componentes pares não múltiplos de 3 na fase 1.	37
Figura 14: Distorção harmônica total dos componentes pares não múltiplos de 3 na fase 2.	38
Figura 15: Distorção harmônica total dos componentes pares não múltiplos de 3 na fase 3.	38
Figura 16: Distorção harmônica total das componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 na fase 1.	39
Figura 17: Distorção harmônica total das componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 fase 2.	40
Figura 18: Distorção harmônica total das componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 na fase 3.	40
Figura 19: Distorção harmônica total das componentes múltiplas 3 na fase 1.....	41

Figura 20: Distorção harmônica total das componentes múltiplas 3 na fase 2.	41
Figura 21: Distorção harmônica total das componentes múltiplas 3 na fase 3.	42
Figura 22: Gráfico do fator de desequilíbrio na rede elétrica.	43
Figura 23: Gráfico do parâmetro P_{st} na fase 1 durante o período 03/nov a 17/nov.	44
Figura 24: Gráfico do parâmetro P_{st} na fase 2 durante o período 03/nov a 17/nov.	44
Figura 25: Gráfico do parâmetro P_{st} na fase 3 durante o período 03/nov a 17/nov.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220).	22
Tabela 02: Valores de referência globais para distorção harmônicas totais.....	24
Tabela 03: Parâmetros de distorção harmônica de acordo com Módulo 8 – PRODIST.....	25
Tabela 04: Limites de operação do sistema.....	28
Tabela 05: Dados de entrada do inversor Fronius Primo.....	32
Tabela 06: Dados de saída do inversor Fronius Primo.....	32
Tabela 07: Limites de Desequilíbrio de Tensão.....	43
Tabela 08: Limites para flutuações de tensão.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
4.1. Geração Distribuída	16
4.2. Sistemas Solares Fotovoltaicos	17
4.3. Qualidade de Energia Elétrica (QEE)	21
4.3.1. Tensão de Regime Permanente	22
4.3.2. Distorção Harmônica	23
4.3.3. Desequilíbrio de Tensão	25
4.3.4. Flutuação de Tensão	26
4.3.5. Variações de Tensão de Curta Duração	27
4.3.6. Variações de Frequência	28
5. METODOLOGIA	29
5.1. Qualímetro NEXUS 1500+	29
5.2. Inversor Fotovoltaico FRONIUS® PRIMO	31
5.3. Coleta e Análise dos Dados	33
6. RESULTADOS E DISCURSÃO	34
6.1. Medições de Distorções Harmônicas de Tensão na Rede Elétrica	35
6.2. Cálculo de Desequilíbrio de Tensão	42
6.3. Medições de Flutuação de Tensão	43
7. CONCLUSÕES	47

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
--	-----------

1. INTRODUÇÃO

No panorama atual, nota-se uma tendência global da substituição gradativa das fontes de energia não-renováveis, tais como, carvão, petróleo e gás natural, estas fontes são oriundas da queima de combustíveis fósseis, pelas fontes alternativas renováveis, tais como: a energia eólica, a energia proveniente dos biocombustíveis, a energia nuclear e a energia solar proveniente do sol. Essa substituição revela uma benéfica preocupação ambiental com a emissão dos gases do efeito estufa e o agravamento do aquecimento global.

Este fenômeno ocorre em fase com o desenvolvimento de novos conceitos de redes elétricas, nas quais possuem forte integração de componentes eletrônicos baseados em eletrônica de potência, sistemas de comunicação e automação. Com isso, surge o conceito de *Smart Grids* ou “Redes Elétricas Inteligentes” como ficou conhecido o termo. Com as *Smart Grids* pretende-se integrar e interacionar várias formas de tecnologias para melhor eficiência da energia elétrica, podendo ser essas, tecnologias da informação e telecomunicações, mobilidade elétrica, acumulação de energia, medição inteligente e bidirecional e automação inteligente (MOLIN, G. D.; 2014).

Uma das características da *Smart Grid* é a presença da Geração Distribuída (GD). Neste contexto, sua característica principal está relacionada com a possibilidade de geração de energia próximo ao centro de carga. Assim, trazendo uma série de benefícios relacionados com a redução de gastos dos consumidores, menor investimento necessário em linhas de distribuição e redução de perdas de energia elétrica no processo de distribuição (ANEEL, 2018).

Diante do exposto, entre as modalidades de energias alternativas em crescimento destaca-se a energia fotovoltaica. A taxa de crescimento anual da geração fotovoltaica global nos últimos 15 anos é cerca de 45% (DUBEY, A.; NIMKAR, P.; CHANDEKAR, A.; BANGDE, P.; BOPCHE, M.; 2018). No contexto nacional, o Brasil é beneficiado pela sua posição geográfica e apresenta bons índices. De acordo com ABSOLAR (2017), estima-se que o Brasil tenha um elevado potencial técnico de energia fotovoltaica da ordem 28,683 GW.

O Brasil destaca-se em energia fotovoltaica devido ao alto nível e a baixa variabilidade de irradiação solar e influenciada pela política energética regulatória para o acesso da microgeração e minigeração distribuída e o sistema de compensação das energias renováveis iniciada em 2012 com a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL (2012) e suas atualizações REN 687/2015 da ANEEL (2015) e REN 786/2017 da ANEEL (2017b).

A cada ano tornou-se nítido a densificação e expansão dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR). Contudo, os sistemas fotovoltaicos estão conectados à rede através de componentes eletrônicos com características não lineares que desencadeiam problemas relacionados com a qualidade de energia elétrica e afetam a confiabilidade do sistema de energia (DUBEY, A.; NIMKAR, P.; CHANDEKAR, A.; BANGDE, P.; BOPCHE, M.; 2018).

A energia solar fotovoltaica é obtida pela conversão da energia proveniente do sol que incide nos painéis fotovoltaicos em energia elétrica através do efeito fotoelétrico. A interface entre os módulos fotovoltaicos e a rede presente nos SFCR é realizada pelos inversores de frequência (PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M.; 2011).

Os inversores de frequência fotovoltaicos são os elementos responsáveis pela conversão da energia elétrica proveniente dos módulos fotovoltaicos, em energia elétrica alternada, entregue no ponto de conexão da concessionária (MACÊDO, W. N.; 2006). Entretanto, a expansão do setor solar fotovoltaico faz com que parâmetros de qualidade de energia elétrica sejam estudados de forma intensiva. Segundo (CASTRO, F. C.; 2019), a forma de onda de corrente produzida pelos inversores fotovoltaicos sofre com uma variação em sua frequência fundamental, durante a geração de energia, e fluem pelas impedâncias existentes ao longo do sistema afetando, em certos casos, o perfil de forma de onda de tensão da rede elétrica.

No presente trabalho pretende-se analisar os distúrbios relacionados com a qualidade de energia elétrica em um ponto de conexão com a rede de distribuição de baixa tensão de inversores de frequência aplicados em sistemas fotovoltaicos. Entre os problemas de qualidade de energia podem ser citados: harmônicos e inter-harmônicos de tensão e corrente, ruído, flutuações de tensão e variações de frequência.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a qualidade de energia elétrica (QEE) de um inversor fotovoltaico solar conectado à rede.

2.2. Objetivos Específicos

O trabalho possui como objetivo específico utilizar o qualímetro NEXUS 1500+ da Electro Industries para realizar as medições das grandezas elétricas em um sistema fotovoltaico. Assim, avaliando a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) de um inversor de frequência FRONIUS PRIMO do fabricante FRONIUS® conectado a um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR). Com isso, realizar a medição da distorção harmônica de tensão na rede elétrica, como também, realizar os cálculos de desequilíbrio de tensão e as medições de flutuações de tensão.

3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os próximos capítulos do trabalho estão organizados da seguinte forma: no capítulo 4, é realizada a fundamentação teórica do trabalho, na qual são abordados os conceitos de geração de distribuída, sistemas solares fotovoltaicos e os fundamentos sobre Qualidade de Energia Elétrica (QEE). O capítulo 5 trata-se metodologia do trabalho, na qual serão abordadas as características técnicas dos equipamentos utilizados na realização do trabalho. Já o capítulo 6, é dedicado à apresentação dos resultados. Em seguida, no capítulo 7, é realizada as considerações finais do trabalho e no capítulo 8 encontram-se as referências bibliográficas usadas no decorrer da elaboração da pesquisa.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Geração Distribuída

A geração distribuída fundamenta-se na construção de unidades geradoras próximo ao consumidor final e ligadas diretamente na rede de distribuição. Entre os fatores da implantação da geração distribuída estão critérios de origem técnica, econômica e ambiental.

A geração distribuída é uma realidade, pois a GD vem mostrando bons resultados com sua aplicação, permitindo a redução de perdas nos sistemas de distribuição, o uso de insumos regionais, o aumento da eficiência de processos industriais, a busca por redução tarifária, permitindo o acesso à energia elétrica por comunidades isoladas, reduzindo o risco de instabilidade do sistema e tornando desnecessário a expansão de ramais de distribuição ou subestações (DRIEMEIER, 2009).

Do ponto de vista técnico, a GD diminui a necessidade de uso de extensas linhas de transmissão. Além disso, minimiza o risco de colapsos sistêmicos. Do ponto de vista econômico, a geração distribuída permite uma redução no consumo de combustível quando feita em sistemas de cogeração. Vale lembrar que em sistemas de cogeração ocorre um processo de “reaproveitamento” com a produção combinada de calor e energia eletromecânica a partir do mesmo processo. Com isso, melhorando a eficiência energética. Outro ponto no qual deve ser atentado é que a GD reduz os custos com transmissão e distribuição, pois a geração ocorre próximo ao consumidor (DRIEMEIER, 2009).

Já no âmbito ambiental, a geração distribuída proporciona uma série de benefícios ao meio ambiente, já que diminui a necessidade da construção de novas usinas hidrelétricas e reduz o consumo de termoeletricas. Consequentemente, reduzindo a emissão dos gases do efeito estufa. Outro ponto positivo da geração distribuída é a incentivo ao uso de fontes renováveis de energia (DRIEMEIER, 2009).

Entretanto, não existe um consenso sobre a definição de geração distribuída. Uma das definições de GD está relacionada com seu planejamento e despacho. De acordo com Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRE), geração distribuída é a geração que não é planejada de modo centralizado, nem despachado de modo centralizada. Portanto, não existe um órgão que comande as ações (DRIEMEIER, 2009).

Já em território nacional, a geração foi definida através do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Segundo a ANEEL, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente ao sistema elétrico distribuição do comprador, exceto: empreendimentos hidroelétricos com potência instalada superior a 30 MW e termoelétrico, incluso cogeração, com eficiência inferior a 75% (ANEEL, 2004).

A geração distribuída pode ser uma solução para os casos nos quais o uso da geração centralizada torna-se impraticável devido a insuficiência do sistema de transmissão (BAYOD-RÚJULA, A. A.; 2009). Entre as tecnologias utilizadas na geração distribuída estão fontes renováveis e não renováveis de energia. Dentre as fontes não renováveis destacam-se microturbinas movidas a gás natural, células combustíveis e motores com combustão interna. Já entre os recursos renováveis, destacam-se as pequenas centrais hidroelétricas (PCH), a energia eólica, energia da biomassa, biogás em microturbina e sistemas fotovoltaicos (MENDES, L. F. R.; PEREIRA, H. M. P. TEXEIRA, P. C.; STHEL, M. S.; 2019).

4.2. Sistemas Solares Fotovoltaicos

É fato que o desenvolvimento tecnológico no qual remonta desde o início da Revolução Industrial está atrelada a necessidade de suprimento energético dos processos e consumidores. Nesse sentido, isto está diretamente relacionado com as mudanças na dinâmica produtivas proposta pela nova era industrial, com altas taxas de crescimento populacional, o aumento das necessidades energéticas das famílias e os contínuos avanços tecnológicos (SILVA, J. C. L.; 2019).

Contudo, a matriz energética mundial ainda é composta majoritariamente por combustíveis fósseis, como o petróleo, gás natural e carvão mineral (Câmara, C. F.; 2011). Apesar disso, nos últimos 40 anos foram notáveis as preocupações com as questões ambientais, inclusive estudos sobre esses problemas estão crescendo mundialmente. As diferentes formas de energias não renováveis causam dependência de condições climáticas, emissão de gases poluentes, elevado custo de implantação e conseqüentemente, elevam o custo do consumidor (PANG *et al.*, 2019).

Com isso, essas pressões influenciaram autoridades e governantes na tomada de decisões de medidas nas quais minimizem o uso indiscriminado de combustíveis fósseis, como é o caso da energia solar (BOYLESTAD & NASHELKY, 2013). A energia solar fotovoltaica é uma fonte adquirida a partir da transformação direta da luz do sol em eletricidade, através de células fotovoltaicas e constitui em uma inesgotável fonte energética com enorme potencial para geração de energia térmica e elétrica (RUTHER, 2004).

O Brasil possui ótimos índices de radiação solar, principalmente no Nordeste brasileiro. Na região do Semiárido encontra-se o melhor índice, com valores típicos de 200 a 250 W/m^2 de potência contínua, equivale a 1752 a 2190 kWh/m^2 por ano de irradiação incidente, colocando o país entre os locais com maior potência de energia solar (MARQUES, R. C.; KRAUTER, S. C. W.; LIMA, L. C., 2009).

Até a década de 70, o uso de sistemas fotovoltaicos era restrito para projetos de elevados orçamentos, como é caso de satélites espaciais. Entretanto, a partir da crise do petróleo, a energia fotovoltaica recebeu investimentos, tanto do setor público, através de programas de incentivos governamentais, como também, de empresas privadas que almejam a energia solar como nicho de investimento (ALVES, 2014).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias: os sistemas isolados, os híbridos e conectados à rede. Os sistemas isolados são aqueles nos quais necessitam de alguma forma de armazenamento de energia, como por exemplo, baterias ou na forma de energia gravitacional. Já os sistemas híbridos, são desconectados da rede e, apresentam várias formas de geração de energia, por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outros. Por último, os sistemas conectados à rede não usam armazenamento de energia, já que a geração é entregue diretamente para rede de distribuição. Todo o arranjo é conectado aos inversores de frequência, nos quais realizam a interface com a rede elétrica (CÂMARA, C. F.; 2011).

Em uma instalação de um sistema fotovoltaico os módulos ou painéis fotovoltaicos são os componentes básicos do gerador solar. A quantidade de células fotovoltaicas depende da carga que será alimentada (CRESESB, 2014).

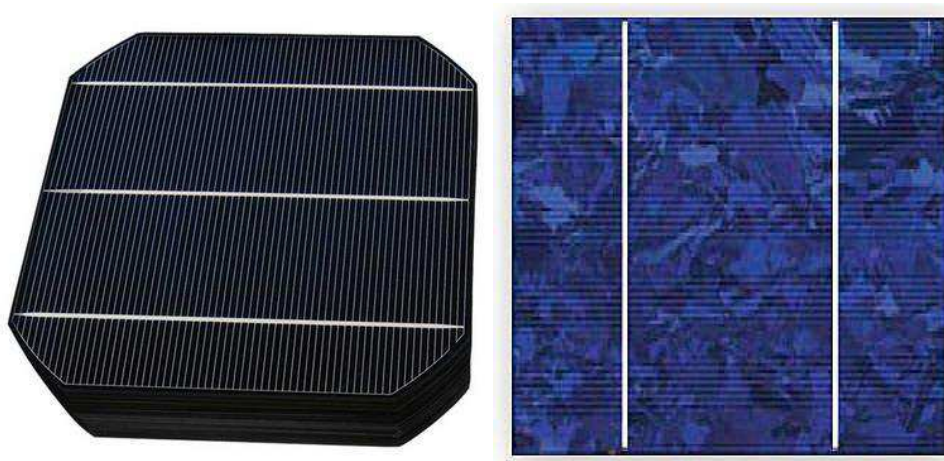
Entre os materiais utilizados na fabricação de células fotovoltaicas destacam-se o silício monocristalino, silício policristalino e os chamados filmes finos, como o silício amorfo, o silício microcristalino, o telureto de cádmio (CdTe), o disseleneto de cobre-índio-gálio ($CuInGaSe_2$),

ou SIGS, o disseleneto de cobre-índio (CuInSe_2), ou CIS, e o arseneto de gálio (GaAs), como também, tecnologias de células orgânicas (ALMEIDA, M. P., 2012).

As células compostas por silício monocristalino são mais comercializadas por apresentarem uma eficiência maior na conversão de luz do sol em energia elétrica. Já o silício policristalino, os cristais de silício são fundidos em um bloco, dessa forma preservando a formação de múltiplos cristais. (BORGES, 2009).

Na Figura 01, são apresentadas células fotovoltaicas compostas de silício monocristalino (figura à esquerda) e do silício policristalino (figura à direita).

Figura 01: Células fotovoltaicas compostas por silício monocristalino e silício policristalino.



Fonte: (NEVES, H. B.; 2015).

O inversor de frequência nos sistemas fotovoltaicos é um dispositivo responsável por transformar a corrente contínua em corrente alternada, além de controlar a qualidade da potência da saída, possibilitando a conexão do sistema com a rede elétrica pública (PINHO & GALDINO, 2014). Os inversores, de modo geral, são constituídos por dispositivos semicondutores de chaveamento: os tiristores (SCR- *silicone controlled rectifier*, TRIAC- *triode for alternating current* e GTO – *gate turn-off thyristor*) ou transistores (TBJ – *bipolar junction transistor*, MOSFET – *metal oxide semiconductor field transistor* e IGBT – *insulated gate bipolar transistor*) (NEVES, H. B.; 2015).

Além dessa função, o inversor de frequência possui uma função que auxilia no melhor aproveitamento de energia produzida – O MPPT – *Maximum Power Point Tracking*. O MPPT permite encontrar o ponto no qual o produto tensão x corrente é máximo, desse modo,

garantindo que potência entregue seja maior possível, diminuindo perdas desnecessária de geração (WIND & SUN, 2022).

A entrada CC do inversor é conectada diretamente ao conjunto de painéis fotovoltaicos. No estágio CC-CC, é gerada uma tensão CC e efetua-se um rastreamento do ponto de máxima potência na entrada proveniente do painel fotovoltaico. No estágio CC-CA, o controle é realizado por modulação PWM – *Pulse Width Modulation*. O seu funcionamento baseia-se no chaveamento em alta frequência de dispositivos, em um ciclo de trabalho variando ao longo do semiciclo proporcionalmente ao valor instantâneo do valor do sinal de referência (NEVES, H. B.; 2015).

De acordo com DAZCAL & MELLO (2008), os inversores devem apresentar alta confiabilidade e baixa manutenção, boa regulação de tensão na saída, baixa emissão de conteúdo audível, baixa emissão de interferência eletromagnética, dissipar a menor quantidade de potência, gerar uma tensão com baixo teor de componentes harmônicas e em sincronia com rede elétrica.

Diante do exposto, é relevante a necessidade de garantir a proteção e o isolamento dos componentes sensíveis do sistema fotovoltaico. Por isso, é utilizado com essa finalidade a *string box*, no qual, é responsável por realizar a proteção do sistema e conexão dos cabos oriundos do módulo fotovoltaico ao inversor de frequência.

A *string box* realiza a proteção contra sobretensão, sobrecorrente e também o seccionamento dos circuitos. Este dispositivo é composto por um invólucro onde estão localizados os dispositivos de proteção e as conexões elétricas; o dispositivo seccionador, neste caso, pode ser usado uma chave seccionadora ou disjuntor. Além disso, é alocado também um Dispositivo de Proteção Contra Surtos – DPS para proteção de sobretensão. Já para proteção de sobrecorrente, é usado disjuntor ou fusível. Como também, é encontrado os cabos de Corrente Contínua (CC) (MOURA, D. M. D, 2022). Na figura 02, é apresentado a *string box*.

Figura 02: String box.



Fonte: Catálogo CLAMPER.

4.3. Qualidade de Energia Elétrica (QEE)

Historicamente, durante a Revolução Industrial, as cargas elétricas alimentadas pela rede eram pouco sensíveis a distúrbios e distorções, possuindo características de robustez, assim os efeitos recebidos pela rede e também gerados pelos próprios equipamentos acabavam sendo praticamente imperceptíveis e não eram avaliados (LOURENÇO, 2012).

Contudo, o desenvolvimento tecnológico promoveu uma mudança de paradigmas, no qual o perfil de carga dos consumidores atuais apresenta forte presença de dispositivos eletrônicos não-lineares. As cargas não-lineares não necessitam de corrente elétrica constantemente, mas solicitam apenas de picos de energia. Assim, as cargas eletrônicas acabam por distorcer a forma de onda (tensão e corrente) que lhe é entregue e como consequência gerando uma “poluição” na rede de energia elétrica (MEHL, E. L. M.; 2012).

Desse modo, o conceito de Qualidade de Energia Elétrica está intimamente relacionado ao funcionamento adequado e sem falhas de cargas elétricas existentes em um sistema elétrico e pressupõe tensões e frequência dentro de valores nominais e sem oscilações ou perturbações,

isto é, as tensões e correntes devem apresentar formas de onda mais próximo possível de uma onda senoidal (PADILLA, J. V.; 2008).

Segundo LOURENÇO (2012), para que se definam estratégias de mitigação dos distúrbios de QEE, é necessário realizar, por meio de um plano de medição, a captura de dados, isto é, grandezas elétricas como tensão e corrente, entre outros, em pontos estratégicos da rede monitorada, no intervalo de tempo apropriado.

Com relação à regulação e verificação do impacto da expansão dos sistemas de energia fotovoltaicos, foi estabelecido o PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional da ANEEL no seu Módulo 8, no qual trata-se dos parâmetros nos quais devem ser atendidos de QEE no sistema de distribuição. Entre os parâmetros avaliados estão: a tensão em regime permanente, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e a variação de frequência (MOLIN, G. D. D.; 2014).

4.3.1. Tensão de Regime Permanente

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST da ANEEL, são estabelecidos os valores para a tensão em regime permanente dentro dos padrões preconizados na regulação. A faixa de valores depende da tensão de atendimento do consumidor, isto é, se o consumidor é alimentado em alta, médio ou baixa tensão.

Na Tabela 01 são apresentados os níveis de tensão em pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220) V.

Tabela 01: Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220).

TENSÃO DE ATENDIMENTO	Faixa de variação de tensão de leitura (V)
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	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

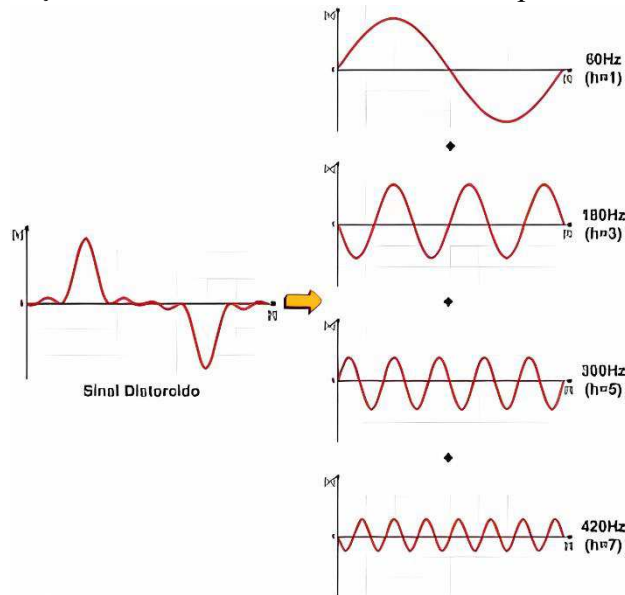
Fonte: ANEEL, 2018b.

4.3.2. Distorção Harmônica

A existência de dispositivos eletrônicos não-lineares e a própria não linearidade de componentes da instalação elétrica e da rede elétrica, pode alterar a tensão e a corrente de um sistema elétrico de corrente alternada, fazendo com que o perfil da forma de onda que deveria ser puramente senoidal possua outros sinais associados ao perfil de onda (LOURENÇO, 2012).

Os harmônicos são tensões ou correntes senoidais que possuem frequências múltiplas da frequência fundamental somadas às componentes fundamentais, esses harmônicos causam distorção na forma de onda do sinal (PADILLA, J. V.; 2008). Os sinais nos quais apresentam distorção na forma de onda podem ser decompostos utilizando a série Fourier em sinais múltiplos da frequência fundamental. Na figura 03 representa-se um sinal com frequência fundamental igual à 60 Hz e suas 3 primeiras componentes harmônicas ímpares $h=3, 5, 7$, respectivamente.

Figura 03: Decomposição de um sinal distorcido em suas 3 primeiras componentes ímpares.



Fonte: (PAULILO, G.; TEXEIRA, M. D.; 2013)

Entre alguns problemas relacionados com as distorções harmônicas estão: problemas com a operação de dispositivos de proteção como relés, disjuntores e fusíveis, aquecimento de condutores, ressonância, diminuição na vida útil dos equipamentos, erros de medição, disparos indevidos de dispositivos de eletrônica de potência, interferência eletromagnética em equipamentos de telecomunicações, flutuações da intensidade luminosa, fenômeno conhecido

como flickers e alterar o funcionamento de equipamentos como computadores e Controladores Lógicos Programáveis (CLP) (SOUSA, 2010).

No Brasil, a regulamentação dos limites harmônicos é feita pela ANEEL no Módulo 8 do PRODIST. Porém, são estabelecidos somente limites para a distorção harmônica da tensão tanto para a distorção harmônica individual (DITH), como também, para a distorção harmônica total (DTT). A distorção harmônica total pode ser calculada pela equação abaixo:

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, os valores de referência para distorção harmônica é apresentado na Tabela 02.

Tabela 02: Valores de referência globais para distorção harmônicas totais.

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69kV$	6
$69 \text{ kV} < V_N \leq 230kV$	3

Fonte: PRODIST, ANEEL, 2013.

Já em relação à distorção harmônica total de componentes harmônicas múltiplas de 3, distorção harmônica total de componentes ímpares não múltiplas de 3 e a distorção harmônica total de componentes pares não múltiplas de 3, podem ser definidas matematicamente pelas equações abaixo.

- Distorção harmônica total de tensão para componentes pares não múltiplas de 3 ($DTT_p\%$).

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

- Distorção harmônica total de tensão para componentes ímpares não múltiplas de 2 ($DTT_i\%$).

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

- Distorção harmônica total de tensão para componentes múltiplas de 3 ($DTT_3\%$).

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h3} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

Sendo:

- h a ordem da componente harmônica;
- hp a ordem da componente harmônica máxima par, não múltipla de 3;
- hi a ordem da componente harmônica máxima ímpar, não múltipla de 3;
- h3 a ordem da componente harmônica máxima múltipla de 3;
- V_h é a componente harmônica de tensão de ordem h;
- V_1 é a tensão fundamental.

De acordo com a norma vigente definida no módulo 8 – PRODIST, os valores máximos permitidos para distorções harmônicas estão apresentados abaixo.

Tabela 03: Parâmetros de distorção harmônica de acordo com Módulo 8 – PRODIST.

<i>Indicador</i>	<i>Tensão nominal</i>		
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10%	8,0%	5%
$DTT_{p95\%}$	2,5%	2%	1%
$DTT_{i95\%}$	7,5%	6%	4%
$DTT_{395\%}$	6,5%	5%	3%

Fonte: ANEEL (2018b).

4.3.3. Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão consiste na diferença entre as amplitudes das tensões de fase de um sistema polifásico ou defasagem entre as tensões do mesmo sistema. O desequilíbrio de tensão é ocasionado pela existência de cargas monofásicas distribuídas de forma inadequada nos sistemas de distribuição. Com isso, acarreta o surgimento de componentes de sequência negativa no circuito (PADILLA, J. V.; 2008).

O desequilíbrio de tensão pode acarretar uma série de problemas ao sistema, entre eles:

- Aquecimento dos motores devido ao conjugado interno gerado pelo desequilíbrio;
- Aumento das perdas nos motores síncronos e de indução;
- Surgimento de componentes de 3ª harmônica.

Para o cálculo deste indicador de QEE pode-se utilizar a expressão abaixo:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_{+100}}$$

Sendo:

FD% é fator de desequilíbrio de tensão (%);

V_+ é a componente de sequência positiva na frequência fundamental;

V_- é a componente de sequência negativa na frequência fundamental.

No Brasil, a norma em vigor, PRODIST módulo 8, determina que, o valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, exceto em baixa tensão, deve ser igual ou menor do que 2%, enquanto em baixa tensão, o valor deve ser de 3% (BORGES, C. F.; 2019).

4.3.4. Flutuação de Tensão

Flutuação de tensão é a variação sistemática no perfil de tensão ou uma série de variações aleatória de magnitude da tensão (PADILLA, J. V.; 2008). Entre os principais efeitos da flutuação de tensão, tem destaque a cintilação luminosa (Efeito Flicker), que é caracterizado pela percepção visual da variação do fluxo luminoso da lâmpada. Este efeito pode atingir o sistema nervoso central do indivíduo, causando disfunções neurológicas, tais como: cansaço visual, estresse mental, perda de concentração, entre outros (BORGES, C. F.; 2019).

A principal causa de variações de tensão é a variação de corrente, principalmente de componentes reativas, por exemplo, alto-forno (PADILLA, J. V.; 2008). A regulamentação é realizada pelo PRODIST módulo 8 no qual determina os limites para avaliação do desempenho do sistema de distribuição (BORGES, C. F.; 2019).

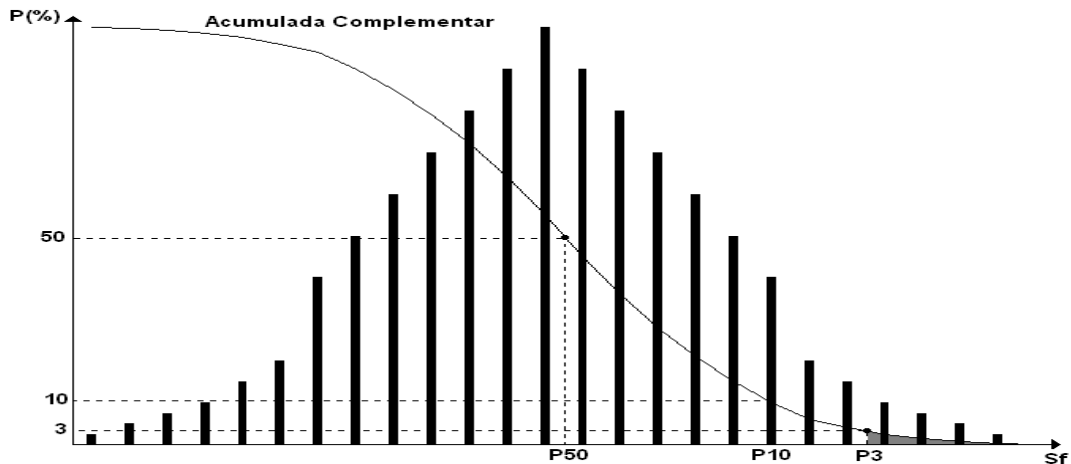
Para fins de cálculo dos parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) em relação ao nível de flutuação de tensão, é definido o parâmetro Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração (Pst). Este indicador pode ser determinado pela fórmula a seguir.

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

Sendo:

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

Figura 04: Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação.



Fonte: ANEEL (2018b).

4.3.5. Variações de Tensão de Curta Duração

De acordo com (IEEE, 2009), as variações de tensão de curta duração configuram-se pelo afundamento, elevação ou interrupção da tensão por um período de tempo inferior a 1 minuto.

O afundamento de tensão caracteriza-se pela redução momentânea do valor eficaz da tensão de 10% a 90% com duração entre 0,5 a 1 minuto. As principais causas deste fenômeno estão relacionadas com as faltas no sistema, pela entrada no sistema de grandes cargas ou a partida de grandes motores (PADILLA, J. V.; 2008).

Já a elevação de tensão configura-se como um fenômeno de incremento do valor eficaz da tensão na faixa entre 110% e 180% e com duração entre 0,5 a 1 minuto. A elevação de tensão é provocada por faltas desequilibradas, saída do sistema de grandes cargas ou a entrada de banco de capacitores. Conseqüentemente, pode causar a degradação ou a falta do isolamento dos equipamentos e a queima de varistores e diodos zener (PADILLA, J. V.; 2008).

Por último, outro fenômeno que causa o desligamento ou falha de equipamentos eletrônicos é a interrupção. A interrupção é caracterizada pelo decréscimo de tensão a um valor inferior a 10% por um intervalo de tempo entre 0,5 a 1 minuto. Este processo é ocasionado por faltas no sistema, falhas em equipamentos ou mau funcionamento do sistema de controle (PADILLA, J. V.; 2008).

4.3.6. Variações de Frequência

A frequência do sistema elétrico está intimamente ligada ao balanço entre carga e geração disponível. Ao ocorrer o desequilíbrio, isto acarreta variações de frequência do sistema. Entre as principais causas desta variação são: faltas no sistema de transmissão, desconexão de grandes cargas e a saída de parques de geração (PADILLA, J. V.; 2008).

Os limites de faixa de frequência que o sistema pode operar fica entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. A tabela abaixo apresenta os limites operacionais de frequência e os respectivos intervalo de tempo.

Tabela 04: Limites de operação do sistema.

Subfrequência		Sobrefrequência	
Frequência	Tempo (s)	Frequência	Tempo (s)
58,5	10	62	30
57,5	5	63,5	10
56,5	Instantânea	66	Instantânea

Fonte: ANEEL (2018b).

5. METODOLOGIA

As medições das perturbações das grandezas elétricas do sistema fotovoltaico *ON-GRID* foram realizadas nas dependências do Laboratório de Proteção Digital situado no Laboratório de Sistemas Elétricos- LSP, pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG-PB).

Na realização do trabalho, foi utilizado um Qualímetro para verificação das grandezas elétricas do sistema fotovoltaico conectado à rede do modelo NEXUS-1500+ do fabricante Electro Industries®. A interface entre o módulo fotovoltaico a rede elétrica é realizada pelo inversor fotovoltaico do fabricante Fronius. A Figura 06 mostra o inversor de frequência instalado no LSP.

Figura 05: Inversor de frequência instalado no LSP.



Fonte: Próprio autor.

A seguir será detalhado os dados técnicos dos equipamentos utilizados.

5.1. Qualímetro NEXUS 1500+

O qualímetro NEXUS – 1500+ é um medidor no qual permite monitorar em tempo real os parâmetros de qualidade de energia elétrica e transientes, como também é capaz de gerar relatórios conforme os padrões internacionais IEC-610004-30 Classe A e EM 50160.

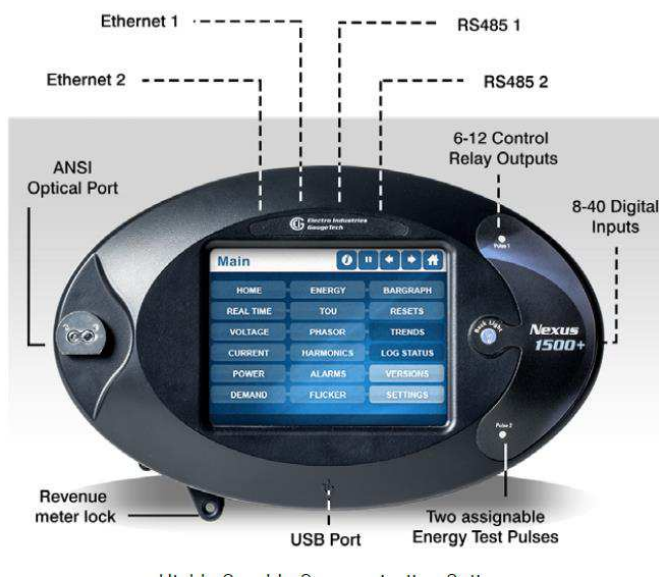
Esse medidor pode ser utilizado para o monitoramento da confiabilidade de uma subestação ou no monitoramento do sistema de automação de uma subestação ou da rede de distribuição. Uma característica do equipamento é a existência de um sistema de auto calibração, no qual calibra o circuito interno a cada 10s, garantindo uma boa precisão ao longo do tempo. Devido ao uso de uma arquitetura mais robusta a Constant Calibration™, no qual usa um canal de calibração do sinal de entrada em tempo real, permitindo um desvio mínimo das grandezas ao longo do tempo ou temperatura.

Outra vantagem do medidor NEXUS – 1500+ é a possibilidade de realizar uma medição de frequência, com uma resolução superior à 10 mHz. Além disso, o medidor permite o registro do perfil de carga, medição da compensação das perdas do transformador e linha.

O medidor NEXUS – 1500+ permite a visualização das componentes harmônicas até a 511ª para cada tensão. Em relação à medição de tensão, o equipamento realiza a medição dos valores RMS da tensão em tempo real e a leitura personalizável de alta velocidade em 2 a 20 ciclos RMS.

Entre os recursos de hardware existentes no qualímetro NEXUS – 1500+ estão: 2 portas RS485 para comunicação usando o padrão Modbus, porta USB no painel frontal, porta óptica no painel frontal padrão ANSI, 2 portas Ethernet endereçáveis separadamente e uma mídia opcional RJ45 com porta Ethernet. Na Figura 05 é apresentado o painel frontal do qualímetro NEXUS – 1500+, onde pode ser observado os recursos existentes no equipamento.

Figura 06: Painel frontal do qualímetro NEXUS – 1500+.



Fonte: data sheet do NEXUS – 1500+

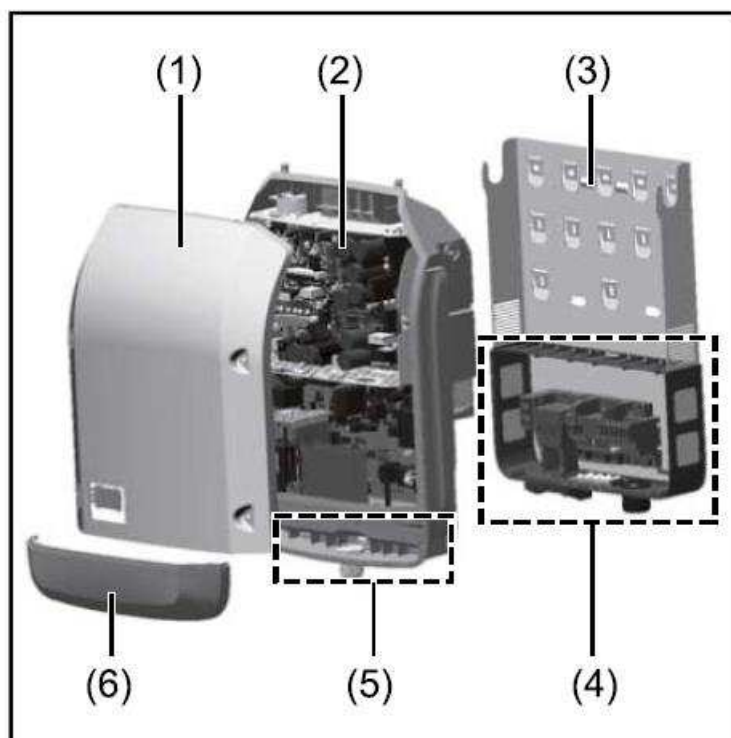
5.2. Inversor Fotovoltaico FRONIUS® PRIMO

O inversor fotovoltaico é um dispositivo responsável pela conversão da corrente contínua advinda dos módulos solares para a corrente alternada de forma sincronizada com a rede elétrica.

O inversor fotovoltaico FRONIUS PRIMO apresenta-se como um inversor monofásico compacto para aplicações comerciais e residenciais de pequeno porte. Este dispositivo realiza o monitoramento da rede a partir do monitoramento de grandezas como: tensão, frequência e os comportamentos individuais. Entre os recursos nos quais o FRONIUS PRIMO possui estão: o rastreamento do ponto de potência máxima, proteção da falha de arco, monitoramento sem fio integrado e interface SunSpec Modbus para monitoramento e registro de dados via plataforma online da fabricante.

Do ponto de vista construtivo, a estrutura básica do equipamento é mostrada na figura 06.

Figura 07: Estrutura básica do inversor fotovoltaico



Fonte: Manual de instalação do Fronius Primo.

Sendo:

(1) Tampa da carcaça;

- (2) Inversor;
- (3) Suporte de montagem;
- (4) Área de conexão incl. Interruptor principal CC;
- (5) Área de comunicação de dados;
- (6) Cobertura de comunicação de dados.

Já em relação aos dados de entrada e saída do equipamento, os dados técnicos são apresentados abaixo:

Dados de entrada:

Tabela 05: Dados de entrada do inversor Fronius Primo.

Quantidade de MPPT	2
Corrente máxima de entrada	18 A
Corrente máxima de curto-circuito do campo do módulo	27 A
Faixa de tensão de entrada CC	80-1000 V
Alimentação de tensão inicial	80 V
Tensão nominal de entrada	710 V
Faixa de tensão MPP	270-800 V
Faixa de tensão MPP utilizável	80-800 V
Quantidades de conexões CC	2

Fonte: <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/instaladores-e-parceiros/dados-tecnicos/todos-os-produtos/inversor/fronius-primo/fronius-primo-8-2-1>>

Dados de saída:

Tabela 06: Dados de saída do inversor Fronius Primo.

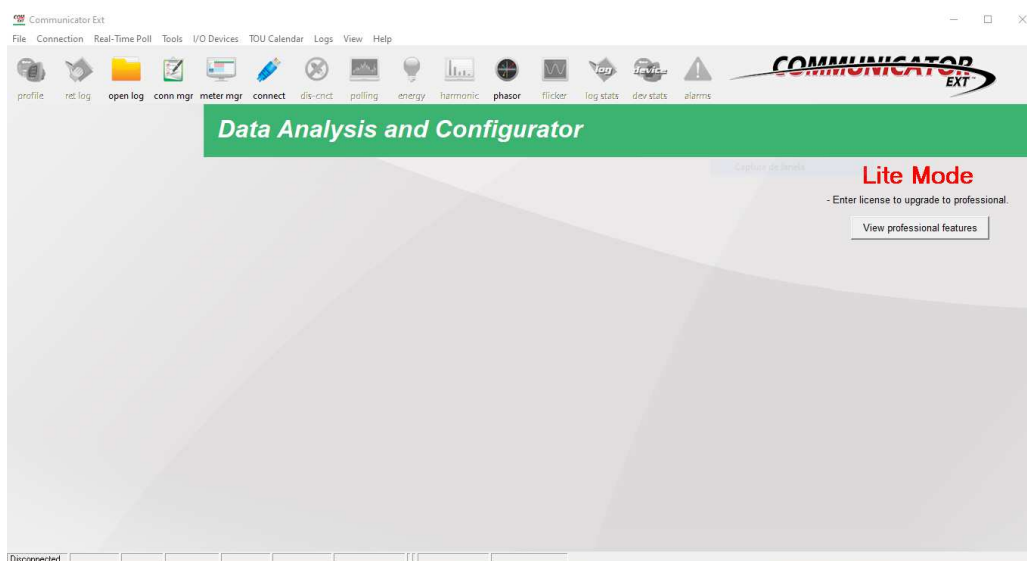
Potência nominal CA	8200 W
Potência máxima de saída	8200 VA
Corrente máxima de saída	35,7 A
Faixa de tensão	180-270 V
Faixa de frequência	45 – 65 Hz
Fator de distorção	5%
Fator de potência	0,85 ind

Fonte: <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/instaladores-e-parceiros/dados-tecnicos/todos-os-produtos/inversor/fronius-primo/fronius-primo-8-2-1>>

5.3. Coleta e Análise dos Dados

Inicialmente, para realizar as medições e coleta dos dados é necessário configurar o qualímetro citado. Para isso, é usado um software para fazer a interface entre o medidor e o computador. O software que foi utilizada trata-se do Communication EXT™. A seguir pode ser observado a tela inicial do software usado durante as medições.

Figura 08: Tela inicial do Communication EXT™.



Fonte: Guia da bancada de medições e captura de sinais (COELHO, R. A.; BRITO, N. S. D.; 2022).

Para fazer a conexão do analisador de qualidade de energia ao computador deve-se clicar inicialmente em “connect” De acordo com a forma de conexão, a relação dos transformadores de medição deve ser alterada. Como o equipamento está monitorando a rede elétrica diretamente sem a necessidade de transformadores de corrente (TC), a relação de transformação usada durante a configuração é 5:5.

A captura de sinais foi realizada usando um comando manual presente no software Communication EXT™. Para recuperar os dados das medições deve-se clicar no botão “ret log” na página inicial. Em seguida, deve-se usar a forma de captura manual alterando a opção “Retrieve Selected Log (s)” por “Manual Waveform Capture” e clica-se no botão “Start” para iniciar. Como pode ser observado na figura abaixo a tela de captura do software.

Figura 09: Tela Log Statistics

Log	Records	Memory Used	Newest Record Time	Oldest Record Time	Record Size	Max Records	Memory(k)	Select
Historical 1	13835	100.0000%	09/09/2022 10:34:00.00	08/30/2022 20:01:00.00	64	13834	1024	<input type="checkbox"/>
Historical 2	24903	100.0000%	09/09/2022 10:34:00.00	08/05/2022 20:30:00.00	32	24903	1024	<input type="checkbox"/>
Historical 3	88939	100.0000%	09/09/2022 10:34:00.00	05/07/2022 14:08:00.00	112	88939	10240	<input type="checkbox"/>
Historical 4	226625	72.8005%	09/09/2022 10:34:00.00	11/15/2019 07:22:00.00	32	311296	10240	<input type="checkbox"/>
Historical 5	85870	100.0000%	09/09/2022 10:34:00.00	05/12/2022 09:46:00.00	116	85870	10240	<input type="checkbox"/>
Historical 6	226625	63.7008%	09/09/2022 10:34:00.00	11/15/2019 07:22:00.00	28	355765	10240	<input type="checkbox"/>
Historical 7	45335	7.2817%	09/09/2022 10:30:00.00	11/15/2019 07:30:00.00	16	622592	10240	<input type="checkbox"/>
Historical 8	45335	7.2817%	09/09/2022 10:30:00.00	11/15/2019 07:30:00.00	16	622592	10240	<input type="checkbox"/>
Event Triggered	0	0.0000%	00/00/0000 00:00:00.00	00/00/0000 00:00:00.00	32	31129	1024	<input type="checkbox"/>
Sequence of Events (Limits)	155	0.9959%	09/05/2022 10:35:55.42	03/12/2020 09:30:45.43	64	15564	1024	<input type="checkbox"/>
Digital Inputs	0	0.0000%	00/00/0000 00:00:00.00	00/00/0000 00:00:00.00	80	12451	1024	<input type="checkbox"/>
Digital Outputs	0	0.0000%	00/00/0000 00:00:00.00	00/00/0000 00:00:00.00	96	10375	1024	<input type="checkbox"/>
Flicker	24903	100.0000%	09/09/2022 10:30:01.03	04/18/2020 14:10:01.03	40	24903	1024	<input type="checkbox"/>
Waveform	18	94.7368%	09/07/2022 05:10:22.36	08/12/2022 16:22:39.07	655792	19	20480	<input type="checkbox"/>
Power Quality	14	0.0402%	09/07/2022 05:10:16.75	08/12/2022 16:22:39.40	572	34827	20480	<input type="checkbox"/>
System Events	2767	8.8889%	09/05/2022 10:35:55.34	02/15/2017 08:39:08.92	16	31128	1024	<input checked="" type="checkbox"/>
EN50160 / IEC 61000-4-30	Yes	Not Applicable	Not Applicable	Not Applicable	Not Applicable	Not Applicable	Not Applicable	<input type="checkbox"/>

■ Polling Device Name

To retrieve a log, click on the checkbox in the 'Selected' column of log(s) that you want to retrieve. Retrieve Selected Log(s) Start Close

Next click the 'Start' Button to begin the retrieval.

Retrieve logs using Modbus

Fonte: Guia da bancada de medições e captura de sinais (COELHO, R. A.; BRITO, N. S. D.; 2022).

Esses dados tratam-se dos valores de tensão para cada uma das fases na rede registrados em tempo real. Os registros de medições ocorreram considerando a captura de dados no intervalo de 2 s ou 2000 ms. Os dados foram coletados entre os dias 03/11/22 e 24/11/22.

A partir dos dados coletados foram utilizados softwares com recursos análise quantitativas dos dados. Os softwares usados durante o desenvolvimento dos resultados tratam-se do Matlab® e Microsoft Excel®. Com isso, foi possível realizar os cálculos de flutuações de tensão e os cálculos de desequilíbrio de tensão. Vale ressaltar, as equações para os cálculos das grandezas elétricas seguem a metodologia estabelecida no Módulo 8 – PRODIST.

6. RESULTADOS E DISCURSÃO

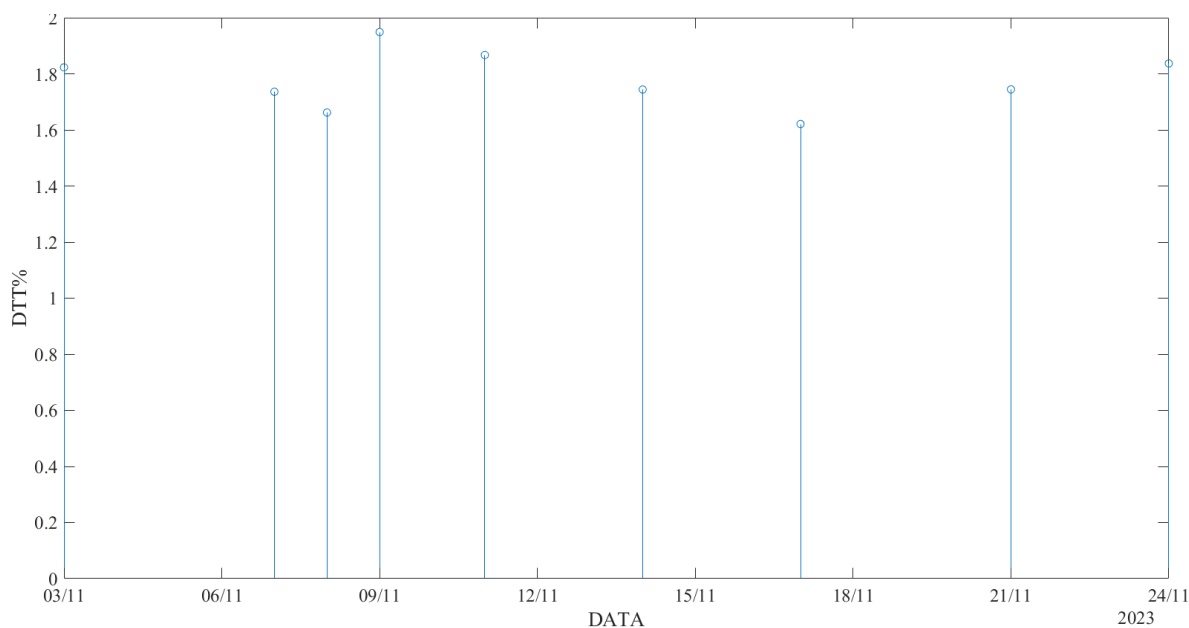
Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos durante o estudo de QEE no inversor fotovoltaico. Os resultados abrangem distorção harmônica de tensão, desequilíbrio de tensão na rede elétrica.

6.1. Medições de Distorções Harmônicas de Tensão na Rede Elétrica

A partir do uso do software Communication EXTTM foram coletadas as medições de distorção harmônica de tensão. De acordo com o Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica do PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional no qual são estabelecidos parâmetros de qualidade relacionados com o nível de distorção harmônica de tensão. Dentre eles: a distorção harmônica total (DDT%), Distorção harmônica total de tensão para as componentes harmônicas pares não múltiplos de 3 ($DDT_p\%$), distorção harmônica total de tensão para as componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 ($DDT_l\%$) e distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 ($DDT_3\%$).

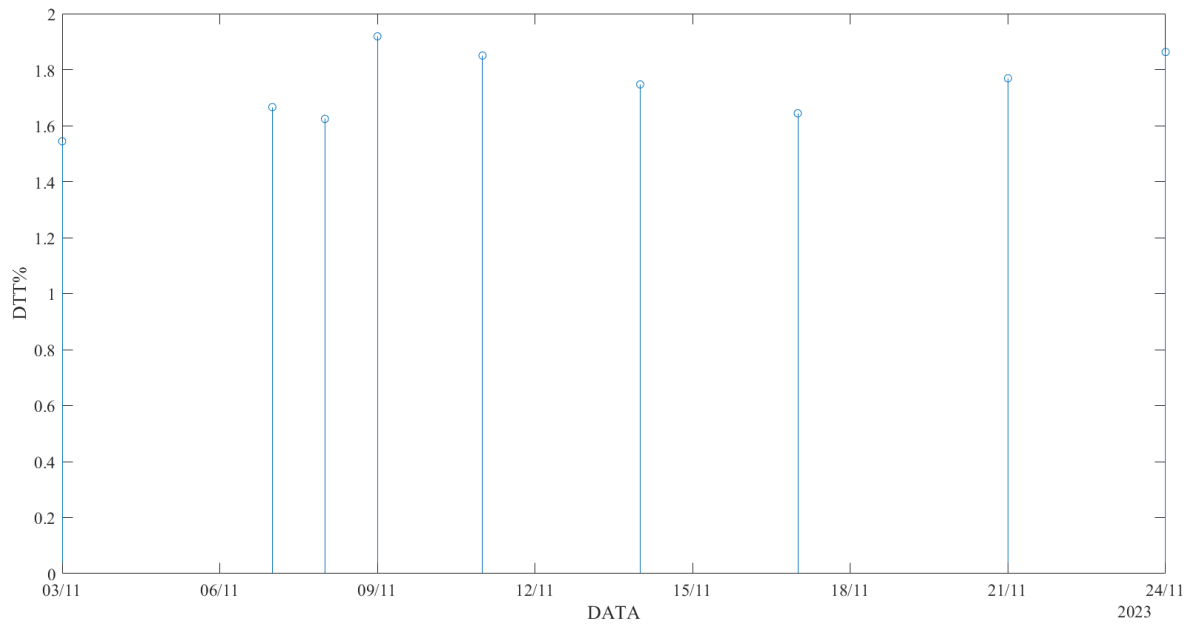
Abaixo podem-se observar os gráficos relativos à distorção harmônica total na rede elétrica para cada uma das 3 fases.

Figura 10: Distorção harmônica total na fase 01.



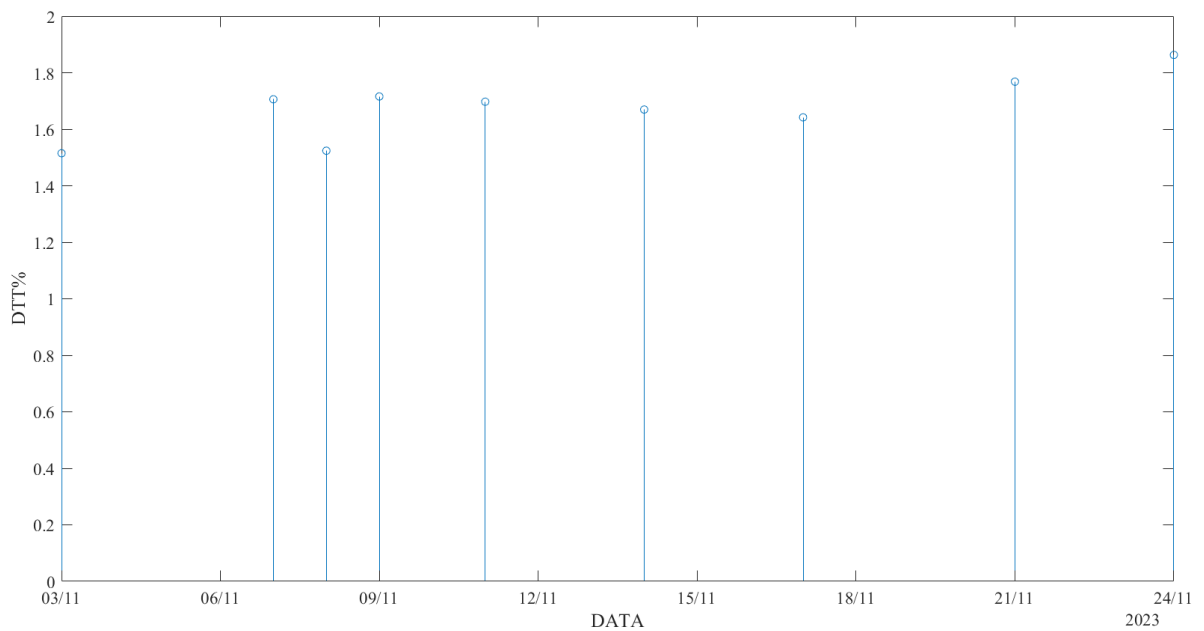
Fonte: Próprio autor.

Figura 11: Distorção harmônica total na fase 02.



Fonte: Próprio autor.

Figura 12: Distorção harmônica total na fase 03.

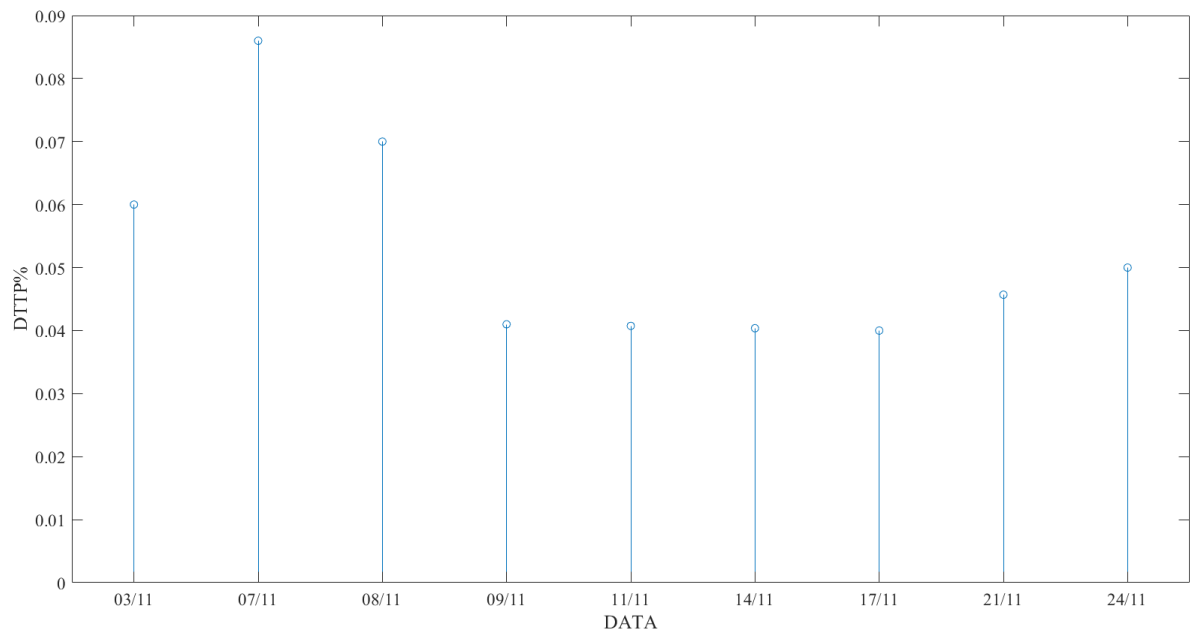


Fonte: Próprio autor.

Nota-se que os valores obtidos para distorção harmônica total durante o período monitorado encontram-se abaixo de 10% no qual é definido como valor máximo permitido. Já em relação aos demais parâmetros, isto é, distorção harmônica total de componentes pares não

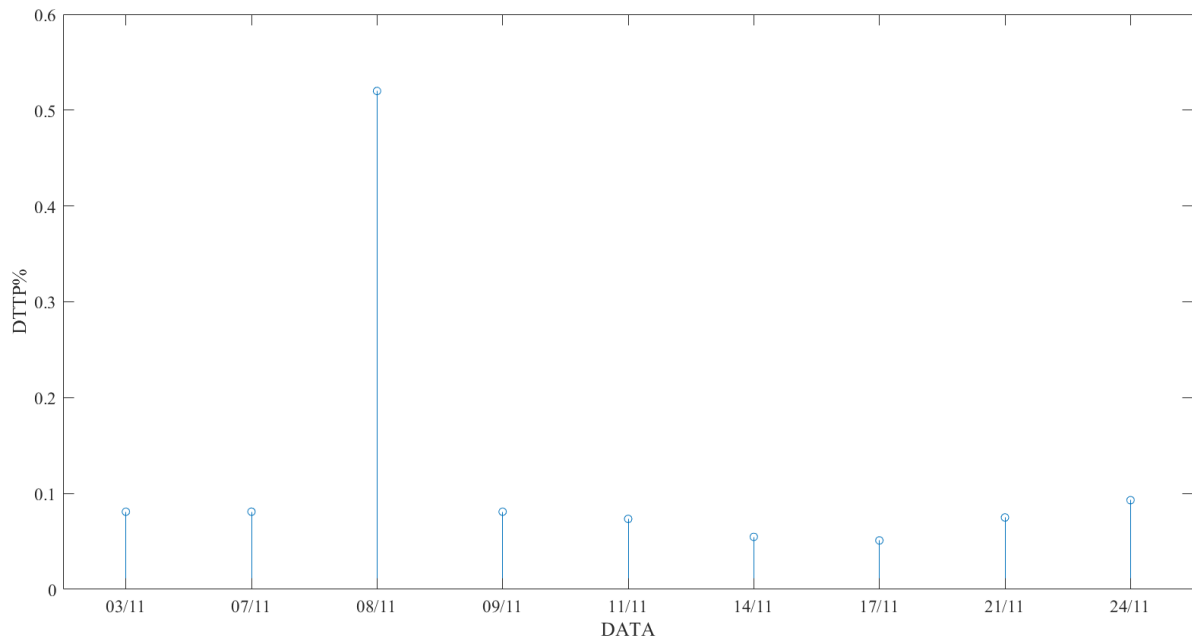
múltipla de 3, distorção harmônica total das componentes ímpares não múltipla de 3 e as componentes múltiplas de 3 podem ser analisadas abaixo.

Figura 13: Distorção harmônica total dos componentes pares não múltiplos de 3 na fase 1.



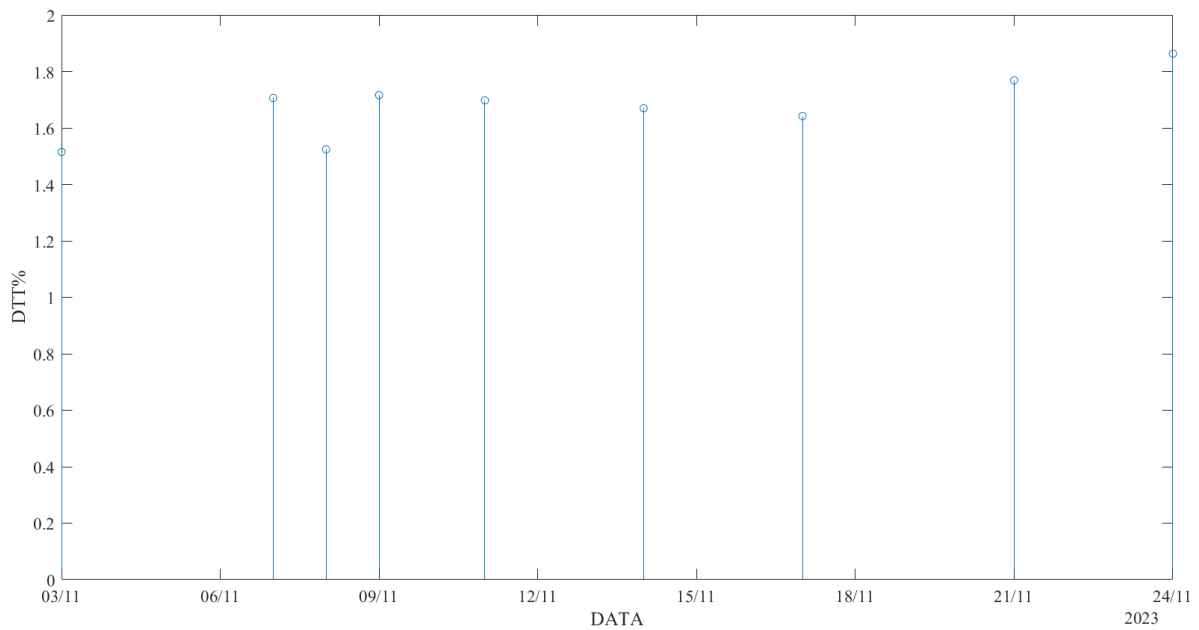
Fonte: Próprio autor.

Figura 14: Distorção harmônica total dos componentes pares não múltiplos de 3 na fase 2.



Fonte: Próprio autor.

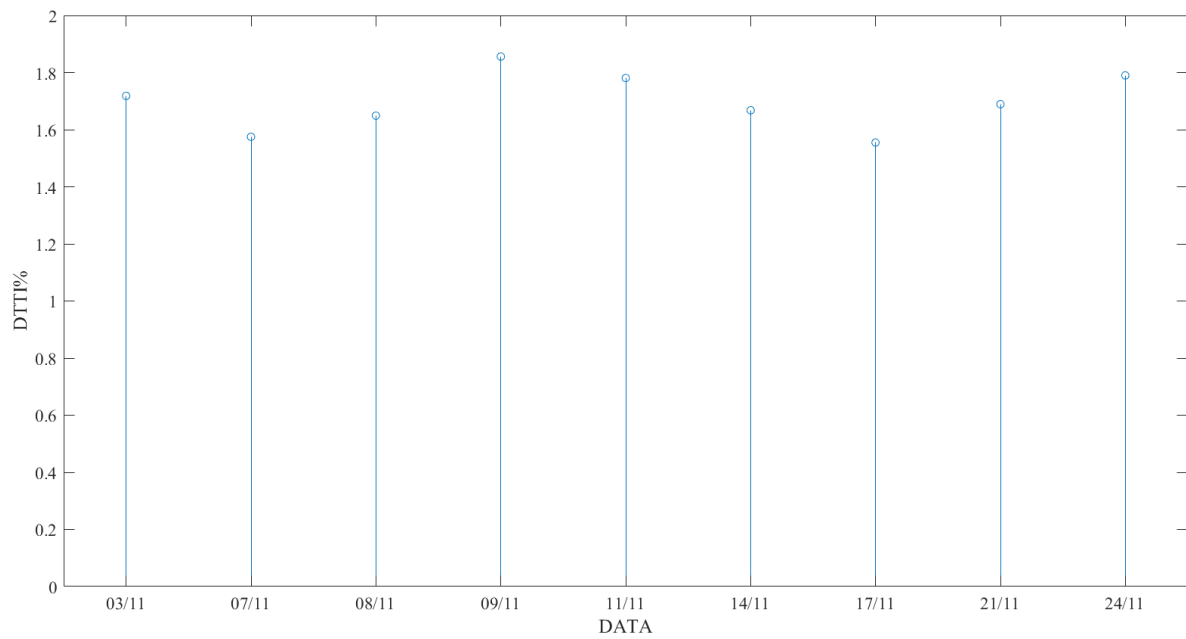
Figura 15: Distorção harmônica total dos componentes pares não múltiplos de 3 na fase 3.



Fonte: Próprio autor.

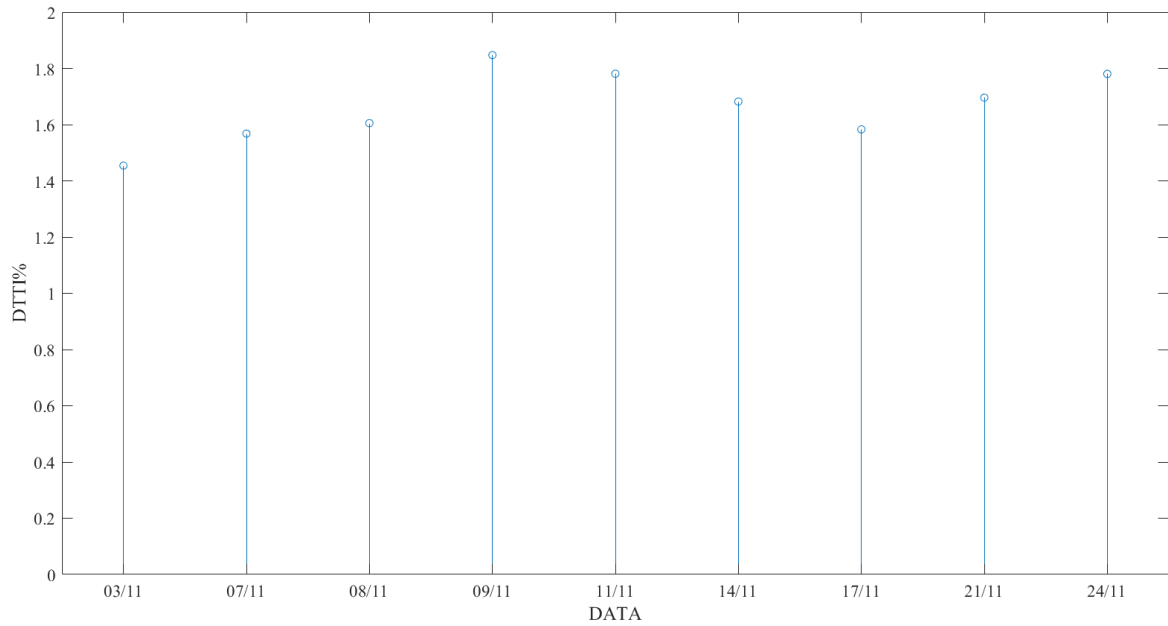
Percebe-se a partir dos gráficos que o valor da distorção harmônica dos componentes pares não múltiplos de 3 encontram-se abaixo de 2,5%, como é definido na resolução do Módulo 8 – PRODIST.

Figura 16: Distorção harmônica total das componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 na fase 1.



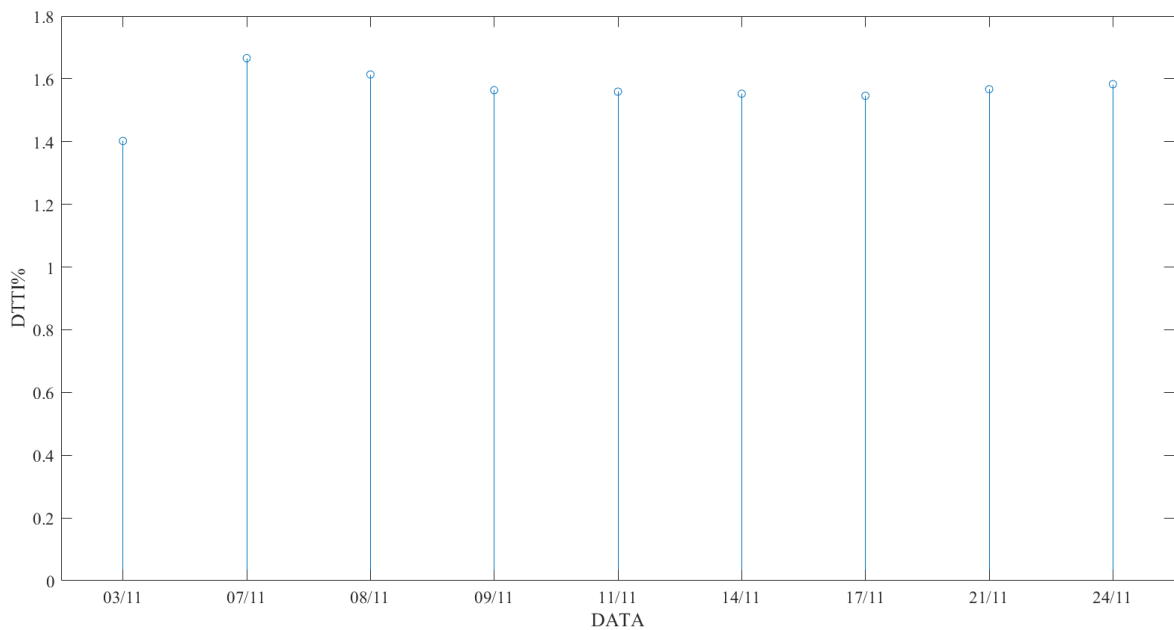
Fonte: Próprio autor.

Figura 17: Distorção harmônica total das componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 fase 2.



Fonte: Próprio autor.

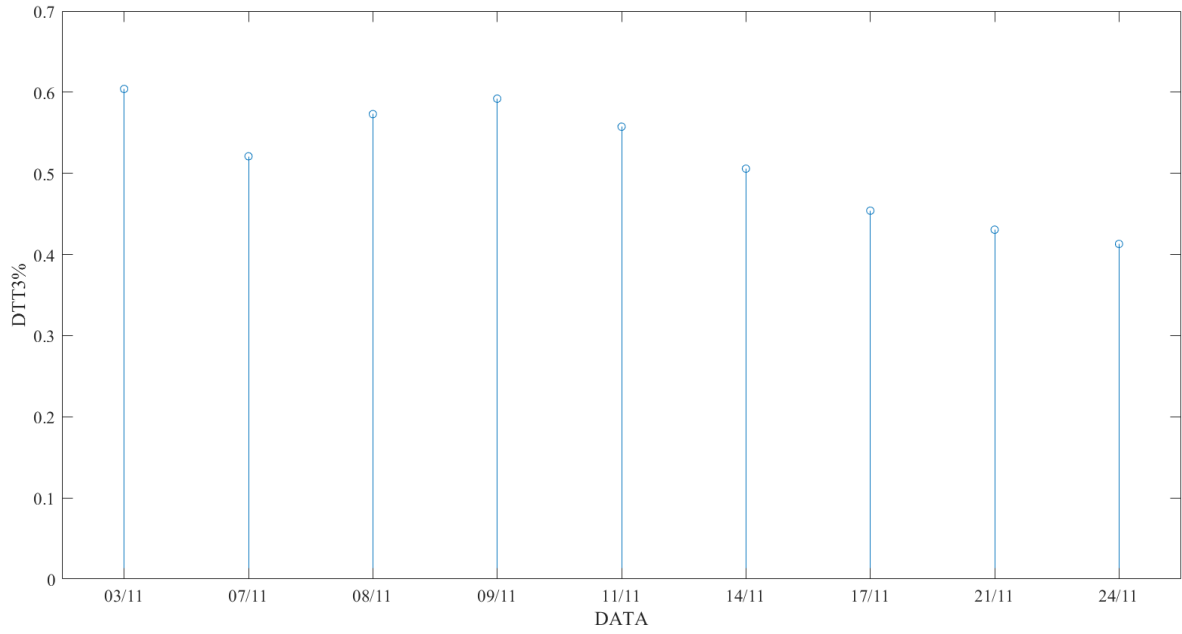
Figura 18: Distorção harmônica total das componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3 na fase 3.



Fonte: Próprio autor.

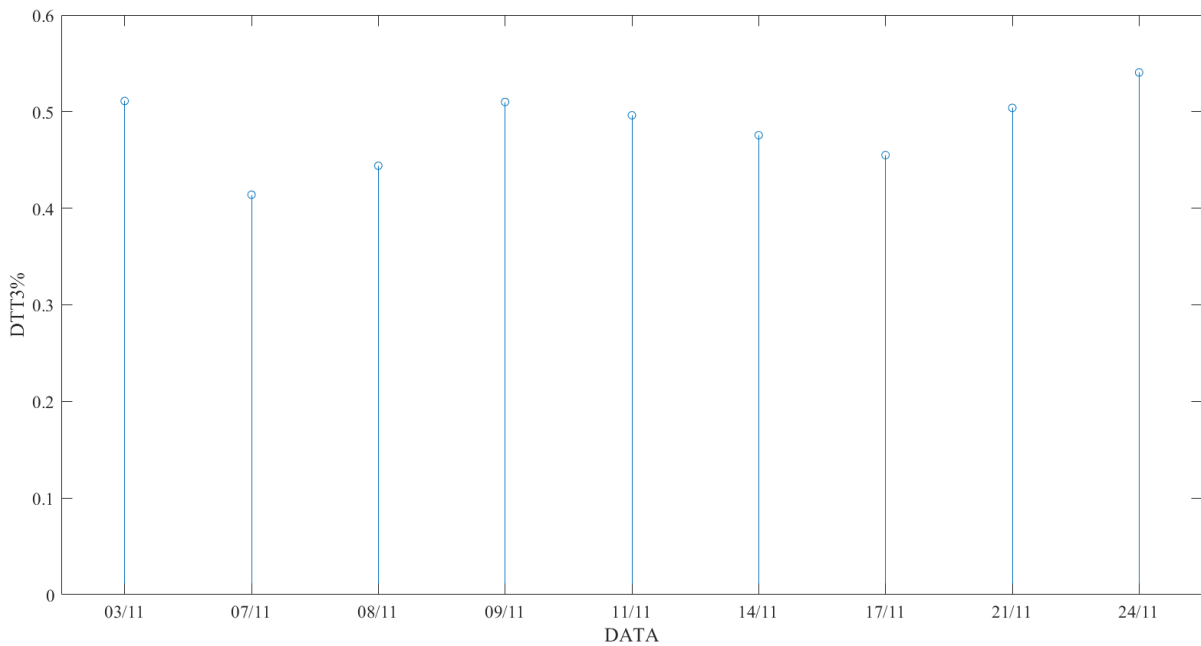
Como pode ser notado a distorção harmônica de componentes ímpares encontram-se em todos os casos abaixo de 6,5%, como é definido no módulo 8 – PRODIST. Já em relação à distorção harmônica das componentes múltiplas de 3, pode ser analisada abaixo.

Figura 19: Distorção harmônica total das componentes múltiplas 3 na fase 1.



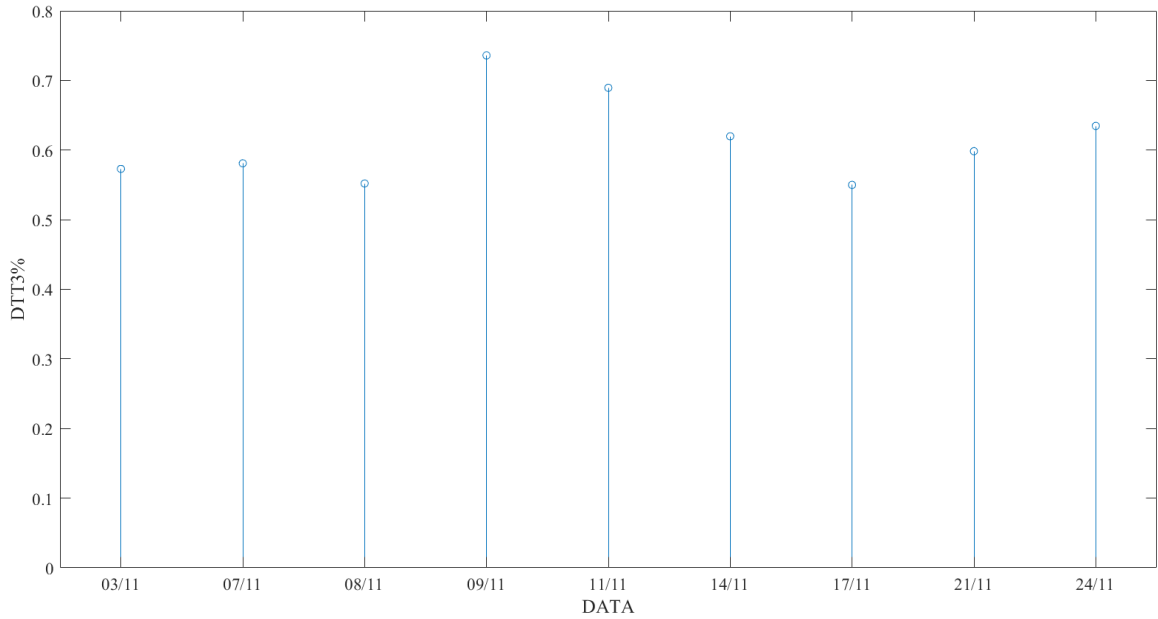
Fonte: Próprio autor.

Figura 20: Distorção harmônica total das componentes múltiplas 3 na fase 2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 21: Distorção harmônica total das componentes múltiplas 3 na fase 3.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com os gráficos nota-se que os valores obtidos para a distorção harmônica estão de acordo com o que preconizado na norma.

6.2. Cálculo de Desequilíbrio de Tensão

A partir dos dados coletados utilizando o software Communication EXTTM pode-se determinar o desequilíbrio de tensão na rede elétrica diante da conexão de inversores fotovoltaicos pela fórmula abaixo:

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

Sendo

$$\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2}$$

De acordo com a norma, os limites máximos permitidos de desequilíbrio de tensão são apresentados abaixo.

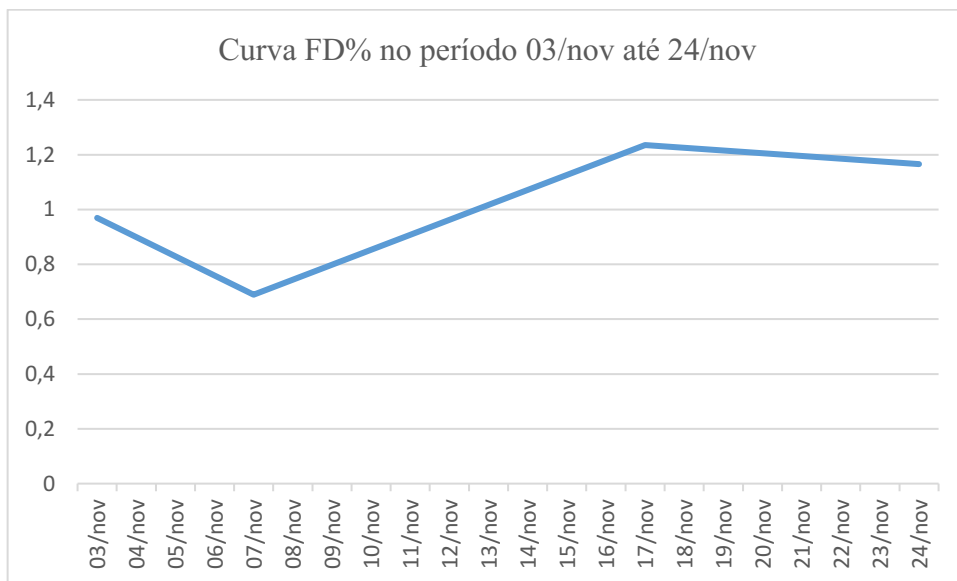
Tabela 07: Limites de Desequilíbrio de Tensão.

INDICADOR	TENSÃO NOMINAL	
	FD95%	$V_n \leq 1 \text{ kV}$
3,0%		2,0%

Fonte: Fonte: ANEEL (2018b).

De acordo com a metodologia de cálculo exposta, foi possível determinar o FD% durante o período de medições. Como pode ser observado no gráfico abaixo.

Figura 22: Gráfico do fator de desequilíbrio na rede elétrica.



Fonte: Próprio autor.

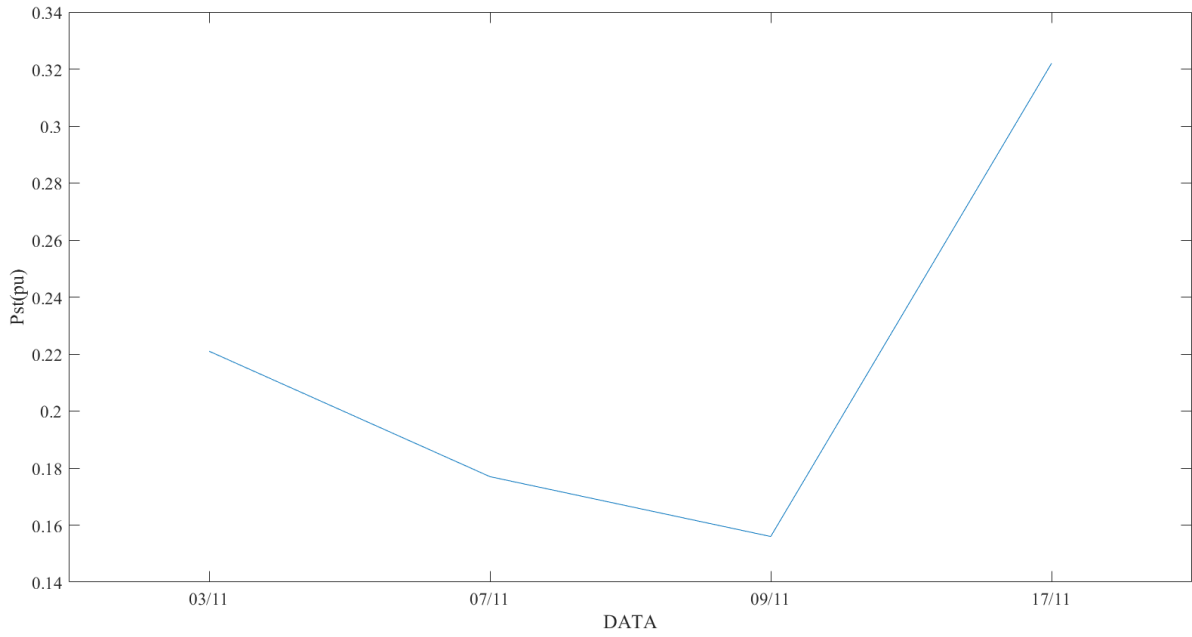
Portanto, nota-se que durante o período considerado o FD% permaneceu abaixo 3%, como é definido pela norma.

6.3. Medições de Flutuação de Tensão

A medição do nível de flutuação de tensão pode ser obtida diretamente pela leitura realizada no próprio medidor de qualidade, com isso, não é necessário calcular o parâmetro P_{st} usando a equação apresentada anteriormente.

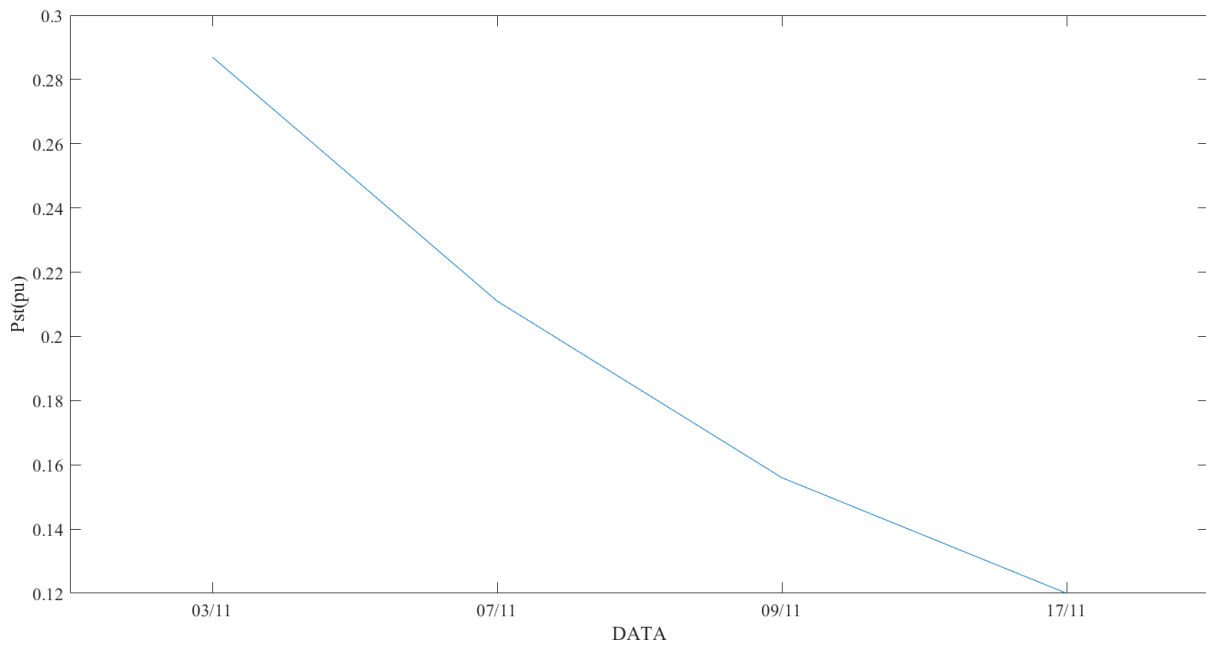
Vale ressaltar, o P_{st} significa a severidade de cintilação luminosa verificada durante um período de 10 min contínuo associada à flutuação de tensão (ANEEL, 2018b). A partir dos dados coletados utilizando o software Communication EXT™ como interface entre o qualímetro e o computador, foram obtidos os valores apresentados nos gráficos abaixo.

Figura 23: Gráfico do parâmetro P_{st} na fase 1 durante o período 03/nov a 17/nov.



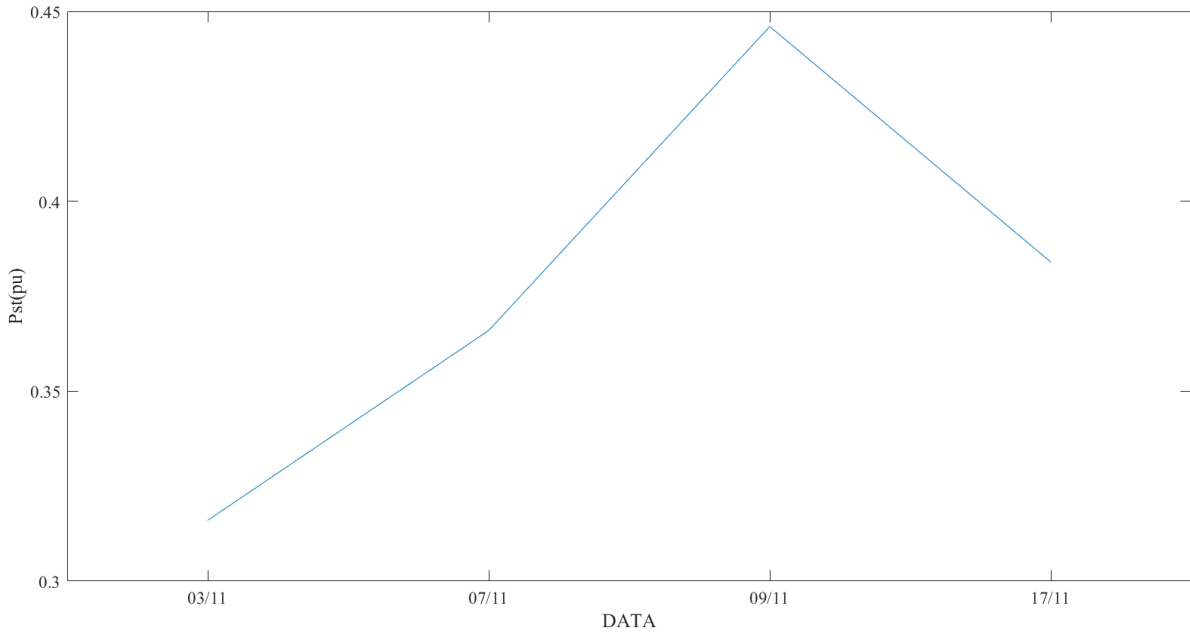
Fonte: Próprio autor.

Figura 24: Gráfico do parâmetro P_{st} na fase 2 durante o período 03/nov a 17/nov



Fonte: Próprio autor.

Figura 25: Gráfico do parâmetro P_{st} na fase 3 durante o período 03/nov a 17/nov



Fonte: Próprio autor.

A partir da visualização dos gráficos do parâmetro P_{st} , isto é, o grau de severidade da cintilação de tensão nas três fases do sistema, constata-se que seu valor permaneceu abaixo 1 pu durante o período de tempo de monitoramento. Nota-se nos gráficos das figuras 23 a 25 que o valor máximo de flutuação de tensão foi em torno, respectivamente, 0,32 pu, 0,29 pu e 0,44 pu.

A norma estabelece limites nos indicadores de flutuações de tensão. De acordo com o módulo 8 do PRODIST, os limites toleráveis de flutuações são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 08: Limites para flutuações de tensão.

INDICADOR	Tensão nominal		
	$P_{st95\%}$	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$
	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: ANEEL, 2018b

Portanto, percebe-se que os valores monitorados para flutuação de tensão estão dentro do limite estabelecido pela norma durante a operação do inversor fotovoltaico.

Outro parâmetro no qual deve ser avaliado é a distorção harmônica de corrente provocada pela inserção do inversor solar fotovoltaico. O padrão IEEE 519/2014 estabelece limites para a distorção harmônica individual e de distorção harmônica total para sistemas com tensão nominal entre 120 e 69 kV. De acordo com a norma IEEE 519/2014, a distorção harmônica total de corrente deve ser inferior à 5%.

Vale ressaltar que a presença de componentes harmônicas de corrente em sistemas fotovoltaicos depende do nível de carregamento do sistema. Como foi verificado por (TEXEIRA *et al*, 2016), nos momentos nos quais a potência no inversor é menor, conseqüentemente, a intensidade da corrente fundamental é menor, acarretando no percentual de distorção harmônica de corrente é consideravelmente superior ao estabelecido pelas normas. Este fenômeno ocorre ao amanhecer e ao pôr do sol.

Outro fator no qual se deve atentar é a melhora da Qualidade de Energia Elétrica proporcionada pela inserção do inversor de frequência. No que tange o domínio da tensão, a entrada de funcionamento deste equipamento promove uma elevação na amplitude da tensão e reduz o conteúdo de componentes harmônicos de tensão. Já em relação a corrente, o percentual de componentes harmônicas de corrente é influenciado pela quantidade de cargas com características não-lineares instaladas, pois neste caso a corrente fornecida pelo inversor também apresentará um comportamento não-linear e, conseqüentemente, elevando o conteúdo harmônico de corrente.

7. CONCLUSÕES

A busca por novas fontes de energias renováveis configura-se como uma tendência nítida atrelada à busca de um mercado mais sustentável, assim como, a expansão do mercado de energia solar fotovoltaica distribuída. As condições geográficas e climáticas favoráveis ao desenvolvimento desses empreendimentos no Brasil, principalmente na região Nordeste.

Entretanto, a utilização de dispositivos com características não – lineares, como é o caso do inversor de frequência usados nos sistemas fotovoltaicos, no qual possuem seu funcionamento baseado na eletrônica de potência provocando na rede elétrica distorções das formas de onda da tensão e corrente, devido a produção componentes harmônicas, prejudicando a Qualidade de Energia Elétrica.

Diante disto, o estudo de QEE mostra-se de crucial para a instalações de sistemas fotovoltaicos conectados diretamente à rede elétrica. No estudo de caso realizado em laboratório com o inversor fotovoltaico FRONIUS® PRIMO, foram avaliados alguns parâmetros de QEE na rede elétrica. Por exemplo, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão e flutuações de tensão. Ao realizar a análise dos dados coletados, nota-se que os parâmetros mensurados se encontram em conformidade com a norma, no caso, foi utilizada Módulo 8 – PRODIST.

Portanto, percebe-se a importância do inversor de frequência em aplicações de sistemas solares fotovoltaicos, pois além de permitir a adequação da corrente CC advinda dos módulos solares e convertida em uma corrente alternada que está em sincronismo com a rede elétrica. O inversor solar fotovoltaico também contribui para redução da distorção harmônica de tensão, como também, provoca uma elevação na amplitude da tensão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, Brasília, 2018b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>>. Acessado em: 17 jun. 2018b

ALMEIDA, M. P. **QUALIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**. 173f. 2012. DISSERTAÇÃO. (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo. São Paulo – SP.

ALVES, G. Energia Solar. 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR - ABSOLAR. **Sessão Especial III: A Expansão do Mercado Solar Fotovoltaico no Brasil**, Salvador-BA, Brasil, 2017

BAYOD-RÚJULA, A. A. **Future development of the electricity systems with distributed generation**. Department of Electrical Engineering, Centro Politecnico Superior, University of Zaragoza, C/Maria de Luna, 3, 50018 Zaragoza, Spain. Energy 34 (2009), p. 377-383.

BORGES, B. A. F. **Implementação de um conversor para painel fotovoltaico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de Trás-os-Montes e alto douro. Vila Real. 2009.

BORGES, C. F. **ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE**. 104f. 2019. TCC. (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Itumbiara/ GO.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 11. ed. Pearson Education do Brasil. 2013.

CÂMARA, C. F. **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**. 68f. 2011. MONOGRAFIA. (Pós-graduação Latu Sensu em formas alternativas de energia). Departamento de engenharia. Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG.

CASTRO, F. C. **Distorção harmônica de corrente produzidas por inversores fotovoltaicos conectados à rede**. 128f. 2019. Dissertação. (Pós – graduação em Engenharia Elétrica e Computação). Universidade Federal de Goiás. Goiânia – GO.

CLAMPER. **Datasheet CLAMPER Solar SB 1040V 20A 2E/1S PC**. Disponível em: https://demape.com.br/wp-content/uploads/2022/03/Datasheet_CLAMPER-Solar-SB-1040V-20A-2E_1S-PC.pdf. Acesso em: 07 fev 2023.

COELHO, R. A.; BRITO, N. S. D. **Bancada para medições de sinais de cargas monofásicas e captura de sinais por meio do medidor NEXUS® - 1500+**. Qualidade de Energia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica. Centro de Engenharia Elétrica e Informática. 2022.

DAZCAL, R.; MELLO, A. **Estudo da Implementação de um Sistema de Energia Solar Fotovoltaica em um edifício da Universidade Presbiteriana Mackenzie**. Abenge Associação Brasileira de Educação de Engenharia. Fortaleza, 2008.

DUBEY, A. CHANDEKAR, M. BOPCHE, P. NIMKAR, AND P. BANGDE, “**A PRELIMINARY STUDY ON HARMONICS GENERATED BY THE GRID-CONNECTED PV SYSTEM ON DISTRIBUTION**”, 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART ELECTRIC DRIVES AND POWER SYSTEM (ICSSEDPS), PP. 50-53, 2018.

DRIEMEIER, L. H. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**. 76f. 2009. TCC. (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS.

FRONIUS PRIMO. **O INVERSOR COMUNICATIVO PARA GESTÃO OTIMIZADA DE ENERGIA**. Fronius. Disponível em: <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/instaladores-e-parceiros/dados-tecnicos/todos-os-produtos/inversor/fronius-primo/fronius-primo-8-2-1>> Acesso em: Outubro de 2022.

IEEE Power and Energy Society. IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE 519-1992). **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. 3 Park Avenue. New York, NY. USA. 2014.

LOURENÇO, T. G. M. (2012). **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO CENTRO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**. Fortaleza, Brasil.

MACÊDO, W. N. **Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a Sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Tese (Doutor em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARQUES, R. C.; KRAUTER, S. C. W.; LIMA, L. C. **Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o Nordeste brasileiro**. Rev. Tecnol. V. 10, n. 2, p 153-162. 2009.

MEHL, E. L. M. **Qualidade de Energia Elétrica**. Universidade Federal do Paraná. 2012. Disponível em: <http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/mehl/posgrad/qualidade-energia.pdf>. Acesso em: novembro de 2022.

MENDES, L. F. R.; PEREIRA, H. M. P.; TEXEIRA, P. C.; STHEL, M. S. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA POR MEIO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO MUNICÍPIO DE CAMPOS DOS GOYATACAZES/RJ: UM ESTUDO DE CASO EM UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR**. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, p. 41-60. 2019.

MOLIN, G. D. D. **Análise de Qualidade de Energia Elétrica de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. 77f. 2014. TCC. (Graduação de Engenharia Elétrica). Universidade do Paraná. Curitiba – PR.

MOURA, D. M. D. **VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF GRID EM RESIDÊNCIA SEM ACESSO A REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO AOS RIBEIRINHOS NO MUNICÍPIO DE SANTARÊM – PA.** 41f. 2022. TCC. (Bacharelado em Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. Cajazeiras/PB.

NEVES, H. B. **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA (SFCR): UM ESTUDO DE CASO.** 139f. 2015. TCC. (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG.

PADILLA, J. V. Qualidade de Energia Elétrica – Aula prática. **Revista O setor elétrico**, p 93-105. 2008.

PANG, Y.; HE, Y.; CAI, H. . Business model of distributed photovoltaic energy integrating investment and consulting services in China. *Journal of Cleaner Production*. 218, 943-965, 2019.

PAULILO, G.; TEIXEIRA, M. D. Capítulo II – Harmônicos – Conceitos. Fascículo Qualidade de Energia Elétrica. **Revista O setor elétrico**. Ed: 85. P 34-42. 2013.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica.** Porto: Publindústria, 2011.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A, et al. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** CRESESB, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/>. Acesso em: novembro de 2022.

RUTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil.** LABSOLAR. Florianópolis, 114p, 2004.

SILVA, J. C. L. **SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA.** 94f. 2019.

TCC. (Bacharelado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Campinha Grande. Campina Grande/PB.

SOUSA. F. C. B. (2010). **ANÁLISE OPERACIONAL DE UMA MICROREDE ELÉCTRICA COM PRODUÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA**. Porto, Portugal.

TEXEIRA, M. D. *et al.* **Análise da Qualidade de Energia de um Sistema Fotovoltaico em Larga Escala**. XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2016.

WIND& SUN - Northern Arizona. **All About Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controllers**. Disponível em: <<https://www.solar electric.com/learning-center/batteries-and-charging/mppt-solar-charge controllers.html>>. Acesso em 10 de novembro de 2022.