

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA FORNECIDA POR UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE APÓS 7 ANOS DE FUNCIONAMENTO

Vinícios dos Santos Barbosa¹ e Maria Izabel da Silva Guerra²

Resumo: Este trabalho avalia a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) instalado no Laboratório de Engenharia I da UFRSA, após sete anos de operação. Foram analisados parâmetros normativos definidos no Módulo 8 do PRODIST e na norma DIS-NOR-031, comparando-os com resultados obtidos em 2018, no primeiro ano de funcionamento. A QEE foi avaliada considerando tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão e variação de frequência. Os dados foram coletados com um analisador de energia durante um mês, totalizando 8.912 amostras. Os resultados mostraram tensões majoritariamente dentro dos limites adequados, embora com picos classificados como precários em horários de alta geração e baixo consumo. O fator de potência manteve-se praticamente unitário, devido à configuração dos inversores para injeção prioritária de potência ativa. A Distorção Harmônica Total de Tensão permaneceu abaixo de 10%, enquanto a Distorção Harmônica Total de Corrente apresentou picos acima do limite de 5% da norma local, especialmente em períodos de baixa irradiância. Entretanto, foi observado que as correntes eram muito reduzidas, o que minimizou impactos à rede. O desequilíbrio de tensão e a variação de frequência permaneceram dentro dos padrões estabelecidos. Comparando com 2018, verificou-se aumento da potência ativa devido à ampliação do número de módulos fotovoltaicos e melhoria no fator de potência médio. Apesar de elevação pontual da DTTi%, o desempenho geral do sistema indica boa estabilidade e confiabilidade após sete anos. Conclui-se que o SFCR apresenta viabilidade e qualidade satisfatórias, reforçando a importância do monitoramento contínuo e de ajustes operacionais para mitigar distúrbios.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico; Qualidade de energia; Distorção harmônica; DIS-NOR-031; PRODIST.

1. INTRODUÇÃO

Com a abundância de irradiância no Brasil e os altos preços cobrados pelas distribuidoras de energia elétrica, a procura por Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) aumentou nos últimos anos, principalmente do ano de 2022 para 2023, segundo o Ministério de Minas e Energia. Grande parte desse aumento foi gerada pela procura de sistemas de pequeno e médio porte, instalados em telhados e pequenos terrenos [1].

Apenas no ano de 2024, o Brasil bateu recorde de novas instalações de sistemas fotovoltaicos, segundo relatório da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Pelos cálculos da Associação, foram adicionados 14,3 (GW) de potência instalada na matriz energética em 2024, o que fez com que o País atingisse a marca de 52,2 GW de potência operacional de fonte solar acumulada [2].

Diante do cenário exposto, com a crescente inserção de sistemas fotovoltaicos conectados nas redes de distribuição de energia elétrica no Brasil, torna-se importante estudar os impactos causados pela energia oriunda dos sistemas fotovoltaicos (FV), quando injetadas nos sistemas de distribuição de energia elétrica, assim como monitorar a qualidade, estabilidade e confiabilidade desses sistemas na energia elétrica fornecida às instalações.

Afinal, mesmo com o avanço da eletrônica de potência, a poluição harmônica ainda é um problema. Ela é produzida pelo chaveamento de inversores de frequência que são utilizados para converter a corrente contínua em alternada. A presença de harmônica oriundas dos SFCR influencia negativamente, pois pode provocar sobreaquecimento de transformadores, piora no fator de potência da rede, acréscimo de perdas nas redes de distribuição, entre outros problemas [3]. Desse modo, se faz necessário o monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica (QEE), para que se tenha um funcionamento adequado dos equipamentos, como também uma boa estabilidade na rede elétrica.

Nesse contexto, Borges [4] analisou os impactos que um sistema FV de 70 kWp, instalado no Instituto Federal de Goiás (IFG) – *campus* Itumbiara, gerou na rede de baixa tensão. O estudo investigou a QEE com base em parâmetros como distorções harmônicas, flutuação de tensão e desequilíbrio, conforme os critérios do Módulo 8 do PRODIST [5]. Os resultados indicaram elevação no perfil de tensão durante períodos de alta geração e aumento de distorção harmônica de corrente em baixa produção, sem ultrapassar os limites normativos.

De modo semelhante, Bandeira [6] avaliou a QEE de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) instalado na UFRSA em Mossoró-RN. A partir de medições em tempo real, foram avaliados parâmetros como

distorção harmônica, fator de potência, variações de tensão e frequência, conforme critérios do Módulo 8 do PRODIST. Os dados mostraram que, apesar de pequenas elevações de tensão e variações no fator de potência, os níveis permaneceram dentro dos limites normativos. O sistema apresentou desempenho satisfatório, com possibilidade de melhorias. A metodologia empregou analisadores de energia e softwares como Excel® e Matlab®. O estudo reforçou a importância de monitorar os sistemas fotovoltaicos após inseridos na rede elétrica.

Nessa mesma linha, Oliveira [7] realizou uma análise estatística da qualidade de energia elétrica fornecida por uma central fotovoltaica de 38,34 kWp instalada na UFERSA, *campus* Pau dos Ferros. Utilizando indicadores do [5] e ferramentas estatísticas como o teste de Kruskal-Wallis com *post hoc* de Dunn-Bonferroni, a autora identificou padrões e anomalias no comportamento das tensões, destacando variações em regime permanente. O estudo destacou a importância do monitoramento contínuo de sistemas fotovoltaicos integrados à rede.

Diante dos pontos abordados, o intuito desse estudo é analisar a qualidade de energia elétrica de um SFCR, situado no Laboratório de Engenharia I, na UFERSA *campus* Mossoró, após 7 (sete) anos de sua instalação. Para isso, serão avaliados os parâmetros: tensão, fator de potência, frequência e distorções harmônicas, que são os parâmetros estabelecidos nas normas vigentes, ou seja, no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [5] e na norma DIS-NOR-031 [8] da concessionária local. Posteriormente, serão comparados os valores medidos no presente trabalho com o apresentado por [6], que foram medidos no ano de 2018.

Quanto a organização desse trabalho, na Seção 2 são apresentados os principais conceitos relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), abordando parâmetros como tensão, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão e variação de frequência. Na Seção 3, é descrita a metodologia adotada, com a caracterização do sistema fotovoltaico analisado, os equipamentos utilizados, o local de instalação e o período de coleta dos dados. Em seguida, a Seção 4 apresenta e discute os resultados obtidos, com foco na comparação dos dados atuais com os registrados no primeiro ano de funcionamento do sistema, em 2018. Por fim, a Seção 5 reúne as conclusões do estudo, destacando o desempenho do sistema após sete anos de operação, bem como recomendações para mitigar problemas observados e sugestões para futuras pesquisas.

2. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

De forma genérica, um dos problemas na Qualidade de Energia Elétrica (QEE) são consequência das conversões de níveis de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) e o aumento de cargas não-lineares no sistema de energia elétrica [9]. Esses fatores contribuem para o surgimento de distúrbios elétricos que podem comprometer o desempenho da rede, ocasionando falhas, danos em equipamentos e insegurança para os usuários.

Com o objetivo de mitigar os problemas, e garantir a qualidade no fornecimento de energia elétrica, a eficiência do serviço prestado pelas distribuidoras, bem como o tratamento adequado das reclamações dos consumidores, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou uma série de normas e procedimentos técnicos para avaliar a energia elétrica distribuída, denominada de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Contudo, é especificamente no Módulo 8 [5], que é abordado sobre os indicadores e a padronização da avaliação da qualidade do fornecimento de energia elétrica no Brasil.

Desta forma, ao se estudar a QEE de um sistema de energia elétrica, os parâmetros elétricos que devem ser avaliados são: variações de tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência, quando se observam os fenômenos de regime permanente; e as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), quando avaliado os fenômenos de regime transitório [5].

2.1. Variações de tensão em regime permanente

A tensão em regime permanente deve ser analisada a partir de um conjunto de dados coletados no ponto de conexão entre a distribuidora de energia e a unidade consumidora. Esses dados devem seguir as especificações em metodologia e intervalo de medição indicados por [5]. Após os dados serem compilados, os resultados obtidos devem ser comparados com a tensão de referência fornecida pela rede elétrica.

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, em regime permanente, o afastamento da tensão lida em relação a tensão de referência pode ser classificada como adequada, precária ou crítica, conforme Figura 1. Para um bom funcionamento no sistema de distribuição, é necessário que a tensão se mantenha dentro dos padrões de tensão classificada como adequada [5].



Figura 1. Faixa de tensão de leitura (TL) em relação a tensão de referência. (Adaptado de [5])

2.2. Fator de potência

O fator de potência (FP) é um indicador de eficiência na utilização da energia elétrica em um sistema ou equipamento. Ele é definido como a razão entre a potência ativa, responsável pela realização efetiva de trabalho, e a potência aparente, que representa o total de energia fornecida ao sistema. Valores de fator de potência próximos a 1 (um) indicam uma operação eficiente, enquanto valores próximos a 0 (zero) sugerem desperdícios de energia e possíveis inadequações no desempenho do sistema.

Então, o monitoramento do FP se torna importante para avaliar a eficiência energética e minimizar as perdas elétricas do sistema. Afinal, a inserção de geradores fotovoltaicos na rede elétrica pode afetar a regulação do fator de potência, uma vez que a geração a partir de fontes renováveis pode gerar distorções na rede elétrica [10].

De acordo com [5], o fator de potência (FP) pode ser calculado com os valores registrados de potências ativa (P) e reativa (Q), como é mostrado na Equação 1.

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

Seguindo as normas vigentes, as unidades consumidoras com tensão inferior a 230 kV devem ter o fator de potência compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo.

2.3. Distorções harmônicas

Segundo [11], as distorções harmônicas são oriundas das correntes e tensões não senoidais que ocorrem devido à presença de cargas não lineares, como os equipamentos eletrônicos conectados à rede.

Dentre as formas de quantificar o nível de deformações das ondas de tensão e corrente em relação à uma onda senoidal perfeita, a distorção harmônica total da tensão (DTTv%) é o indicador apontado pelo Módulo 8 do PRODIST e a distorção harmônica total de corrente (DTTi%) é o parâmetro que deve ser avaliado para obedecer aos requisitos da norma DIS-NOR-031 da concessionária [8].

Os limites para as distorções harmônicas estabelecidos nas normas brasileiras vigentes estão organizados na Tabela 1 e será usado como referência para avaliar a conformidade do sistema FV em estudo com as normas.

Tabela 1. Limite das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental). [5,8]

Indicador	Tensão Nominal
	Vn ≤ 2,3 kv
Distorção harmônica total de tensão (DTTv%)	<10,0%
Distorção harmônica total de corrente (DTTi%)	<5%

2.4. Desequilíbrio de tensão

Conforme indica o Módulo 8 do PRODIST [5], a avaliação do desequilíbrio de tensão deve ser feita com base no parâmetro Fator de Desequilíbrio de Tensão (FD). Para esse parâmetro, deve ser verificado se 5% das 1.008 leituras coletadas ultrapassaram os limites determinados em norma. Esse critério permite analisar o desempenho do sistema ao longo do tempo de forma representativa.

Para redes com tensão nominal inferior a 2,3 kV, como o presente trabalho, o limite permitido para o FD% é de 3%, sendo este o valor máximo recomendado para manter a qualidade da energia elétrica distribuída [5]. O limite para o indicador de desequilíbrio de tensão avaliado no presente estudo é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Limites para os desequilíbrios de tensão. [5]

Indicador	Tensão Nominal
	$V_n \leq 2,3 \text{ kv}$
FD%	3,0%

2.5. Variação de frequência

Como o próprio nome sugere, a variação na frequência está relacionada à sua oscilação tendo a frequência fundamental (60Hz) como referência. O Módulo 8 da PRODIST impõe que sistemas de distribuições e instalações conectadas às redes devem operar dentro dos limites de frequência de 59,9 Hz e 60,1 Hz, em condições normais de operação e em regime permanente [5].

Além disso, quando eventualmente for detectado distúrbios no sistema de distribuição, as instalações das geradoras devem restaurar a frequência em um intervalo inferior ou igual a 30 segundos após o distúrbio. Essa restauração é essencial para permitir a recuperação do equilíbrio entre a carga e a geração.

Dessa forma, compreende-se a importância de avaliar os principais parâmetros da Qualidade da Energia Elétrica em SFCR. O estudo desses parâmetros e seus limites normativos é essencial para garantir o bom desempenho dos sistemas e a estabilidade da rede elétrica. Na Seção 3, será apresentada a metodologia adotada neste trabalho, incluindo a descrição do sistema analisado e os procedimentos de medição.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho tem como finalidade avaliar a qualidade da energia elétrica de um sistema fotovoltaico conectado à rede após 7 anos de funcionamento e, posteriormente, comparar com os valores medidos no primeiro ano de funcionamento. O estudo será realizado no Laboratório de Engenharia I da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), *campus* Leste, da cidade de Mossoró. O sistema possui 48 módulos fotovoltaicos do fabricante Canadian Solar, modelo CS6U-325P, com potência de 325 Wp, logo a potência total instalada é de 15,6 kWp. Para a conversão de corrente contínua para a corrente alternada foram utilizados dois inversores do fabricante ABB, modelo PVI- 10.0-TL-OUTD, de 10 kW de potência cada [12]. A Tabela 3 mostra as principais características técnicas do inversor e a Figura 2 apresenta um diagrama unidirecional do sistema.

Tabela 3. Especificações técnicas no inversor ABB PVI- 10.0-TL-OUTD. [12].

Corrente contínua máxima (I_{DCmax})	34.0 A
Faixa de tensão contínua de entrada (V_{DC})	220 V - 850 V
Tensão máxima de entrada (V_{DCmax})	900 V
Potência nominal de saída AC (PAC, r)	10000 W
Potência aparente máxima de saída	11500 VA
Corrente máxima de saída	16,6 A
Tensão nominal de saída (V_{AC})	320 - 480
Frequência nominal (f_r)	50 Hz / 60 Hz
Distorção harmônica atual total	< 2%
Fator de Potência	> 0,995, para PAC, r = 10.0 kW

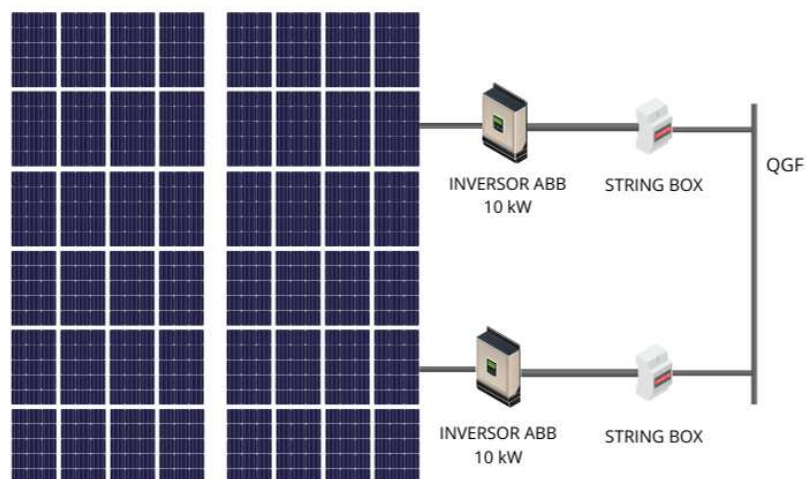


Figura 2. Diagrama unidirecional do sistema FV em estudo. (Autoria própria)

Para a realização das medições deste estudo foi utilizado um analisador de energia elétrica da marca Minipa, modelo ET-5061C, instalado no ponto de conexão entre a saída do inversor fotovoltaico e a rede elétrica, conforme estabelecido em [5]. A Figura 3 apresenta o esquema de ligação trifásico a quatro fios utilizado para a coleta dos dados.

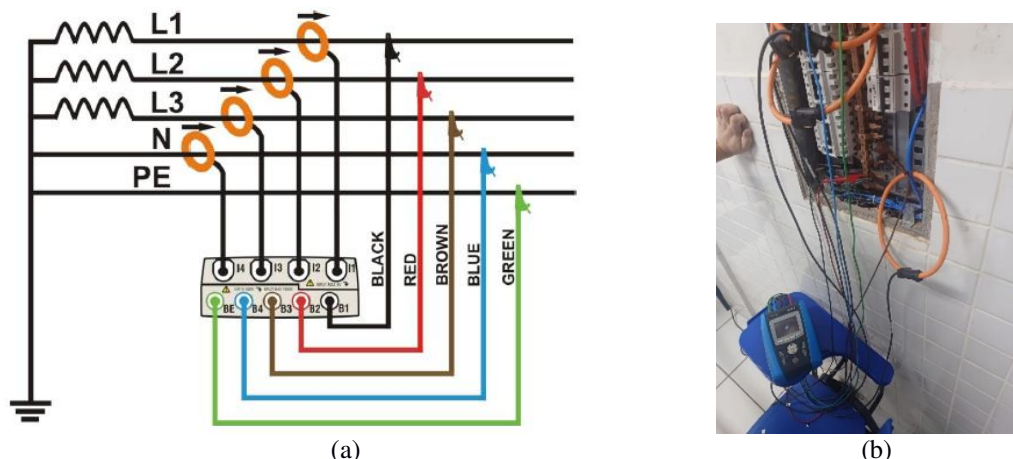


Figura 3. (a) Diagrama de conexão do analisador de energia (13) e (b) equipamento instalado *in loco*. (Autoria própria).

Os parâmetros configurados para registros no analisador de energia elétrica foram: tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, potência aparente, componentes harmônicos e fator de potência. Os registros foram capturados a cada 5 minutos, entre os dias 07 de janeiro e 07 de fevereiro de 2025, totalizando 8.912 amostras. Esse total ultrapassa as 1.008 leituras consecutivas exigidas no Módulo 8 do PRODIST.

Após a coleta pré-estabelecida, um banco de dados foi compilado e tratado com auxílio dos softwares Microsoft Excel® e TopView®. Por fim, os principais resultados extraídos são apresentados e discutidos na Seção 4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o tratamento dos dados, foi observado que há uma repetibilidade diária no comportamento dos parâmetros, ou seja, repete-se a cada 293 amostras. Desta forma, a presente Seção apresentará os resultados de uma parcela dos dados, que corresponde ao intervalo de geração elétrica do sistema fotovoltaico no decorrer de um único dia. As 11 horas de análise apresentada são do dia 28 de janeiro de 2025, das 7h02min às 18h02min, totalizando 133 amostras. Esse período incorpora o horário com incidência mais significativa da irradiância solar sobre os módulos FV, ou seja, intervalo em que foram observados comportamentos mais distintos.

4.1. Tensão em regime permanente

A Figura 4 apresenta os valores de tensão das três fases da instalação elétrica, assim como é destacado em vermelho, os limites mínimos e máximos para a tensão se manter dentro da classificação adequada, conforme explicado na Subseção 2.1.

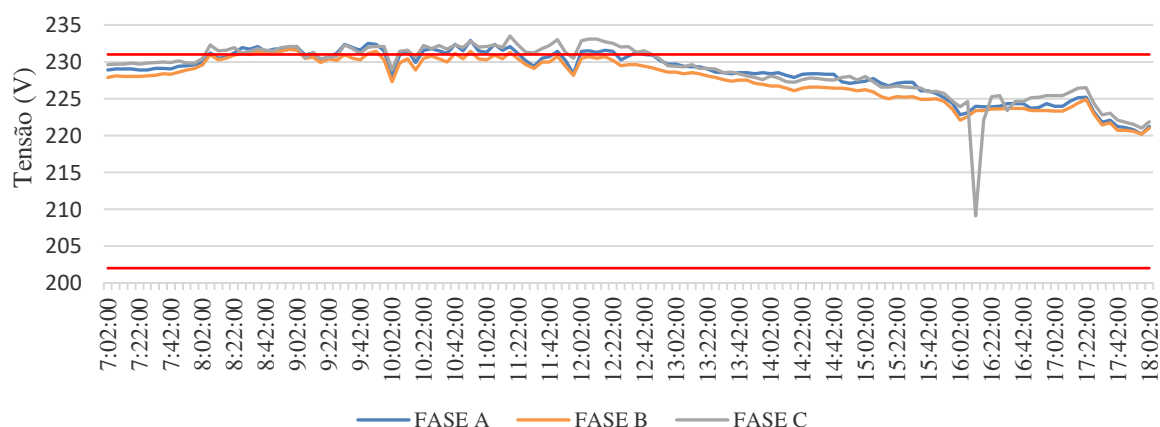


Figura 4. Tensão em regime permanente - Fase A, B e C. (Autoria própria).

Durante a maior parte do período de monitoramento, os níveis de tensão permaneceram dentro da faixa adequada estipulada pela norma [5].

Contudo, foram registradas algumas sobretensões, destacando-se em dois momentos distintos (11h32min e 12h07min), horário de alta irradiância, mas baixa potência ativa e aparente, como visto na Figura. O valor máximo de tensão alcançado foi de 234,6V. Conforme os critérios estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, o pico de 234,6 classifica-se na faixa de tensão precária. Uma possível medida corretiva para essas ocorrências consiste na configuração do inversor para limitar a injeção de potência ativa quando a tensão na rede atingir o limiar predefinido nas normas vigentes.

4.2. Análise do triângulo de potência

A medição das potências ativa, reativa e aparente do sistema fotovoltaico é importante para calcular e analisar o parâmetro fator de potência. Sabendo disso, foram realizadas as medições das potências que compõem o triângulo de potência, conforme ilustrado nas Figuras 5 e 6.

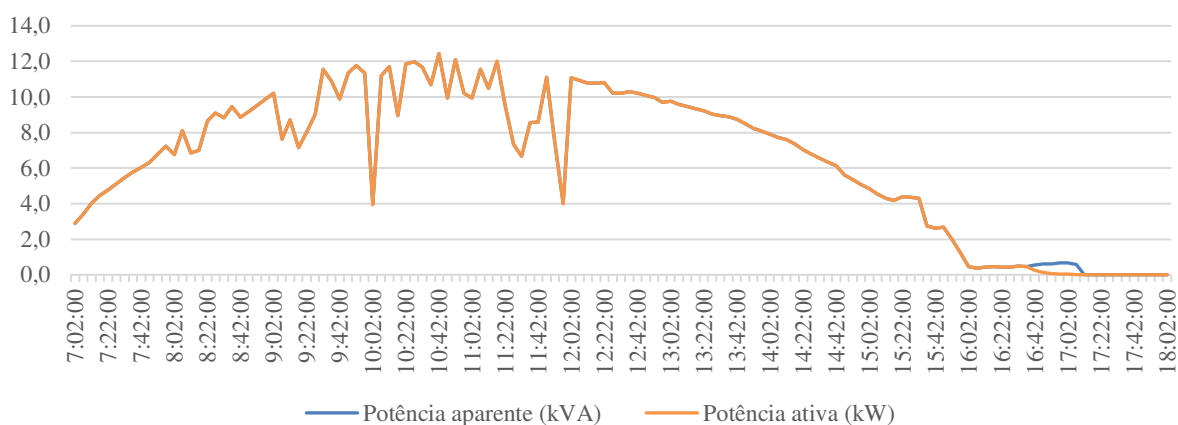


Figura 5. Potência ativa e aparente ao longo do dia. (Autoria própria)

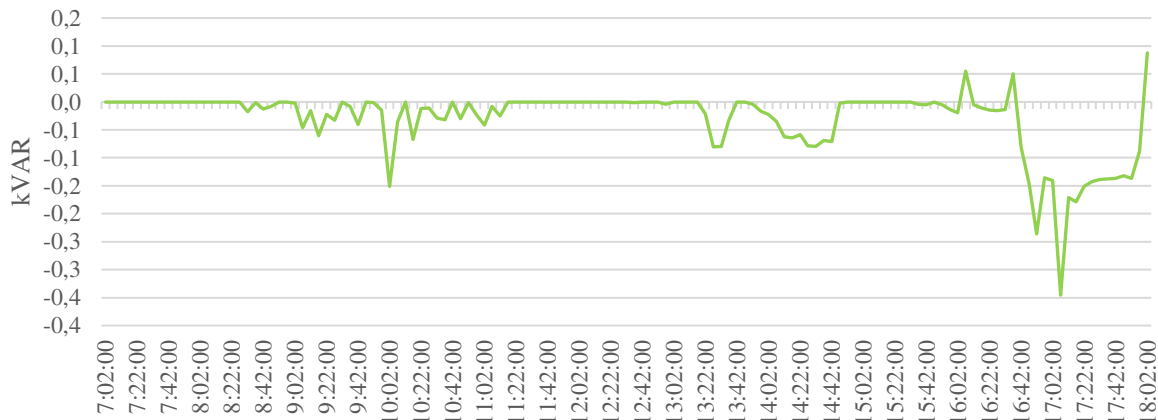


Figura 6. Potência reativa ao longo do dia. (Autoria própria)

As Figuras 5 e 6 apresentam as curvas de variação da potência ativa, reativa e aparente ao longo do dia. Observa-se que essas curvas mantêm um perfil estável, com pouca oscilação, o que pode ser atribuído ao comportamento das condições ambientais no decorrer de um dia com ausência de nuvens, ou seja, que apresentam uma irradiância crescente até próximo ao meio-dia e, posteriormente, decrescem gradativamente. Esse comportamento favorece a geração fotovoltaica contínua. Durante esse intervalo, os valores máximos de potência ativa, reativa e aparente registrados foram de, respectivamente, 12,44 kW, -0,40 kVAR e 12,44 kVA. No geral, as médias observadas foram em torno de 8 kW, -0,29 kVAR e 8 kVA, respectivamente.

A potência reativa apresentou valores tão baixos, que as curvas de potência ativa e aparente praticamente se sobrepõem, como pode ser observado na Figura 5. Além disso, o pico máximo da potência reativa foi de -0,40 kVAR, indicando que os inversores estavam operando com fator de potência capacitivo, ou seja, fornecendo potência reativa capacitiva à rede. Além disso, observou-se que, ao final do dia, quando a potência ativa atinge valores próximos de zero, ocorreu um aumento da potência reativa, mas, logo em seguida, se restabelecendo para potência reativa indutiva. Esse comportamento indica uma mudança no perfil de carga ou nas condições

operacionais do sistema, o que merece atenção na análise da qualidade da energia elétrica, pois afeta no parâmetro fator de potência, mostrado na Subseção 4.3.

4.3. Fator de potência

No dia 28 de janeiro de 2025 também foi avaliado o fator de potência da instalação, respeitando o mesmo intervalo de medição, conforme apresentado na Figura 7. Na Figura 7 também é destacada em vermelho o limite de FP estabelecido em [5] e [8].

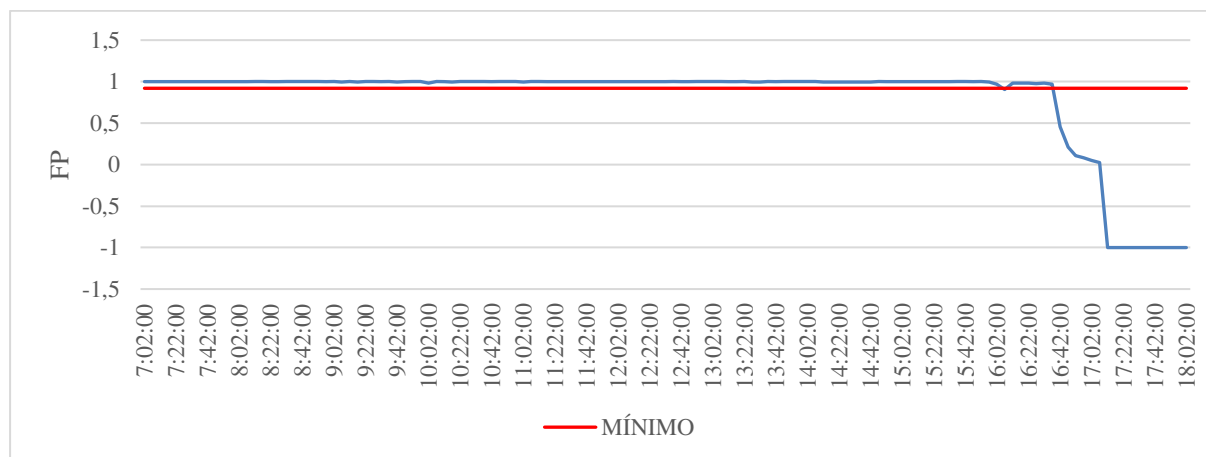


Figura 7. Fator de potência (autoria própria)

Ao observar a Figura 7, percebe-se que o fator de potência se manteve praticamente constante, com valor unitário e característica predominantemente capacitivo na maior parcela do tempo analisado. Esse comportamento indica que o inversor operou com foco na injeção de potência ativa, com o mínimo de fornecimento de potência reativa capacitiva. É observado que a queda no fator de potência ocorre ao final do dia, quando a potência ativa se aproxima de zero, o que indica a interrupção da geração. Em seguida, o fator de potência volta a se estabilizar, possivelmente após o inversor deixar de operar.

É importante destacar que o fator de potência se manter unitário é esperado devido à configuração dos inversores, que são programados para operar com fator de potência constante e unitário, injetando apenas potência ativa no sistema, para que as chaves de comutação operem com eficiência máxima. Essa característica é corroborada por [14], que descrevem técnicas de controle para inversores trifásicos conectados à rede operando com fator de potência unitário.

4.4. Distorções Harmônicas Totais

A Figura 8 apresenta os valores de Distorção Harmônica Total da Tensão (DTTv%) obtidos nas três fases do sistema FV, monitoradas no decorrer do dia 28 de janeiro de 2025. Observa-se que os valores obtidos permanecem dentro do limite de até 10% determinado em [5].

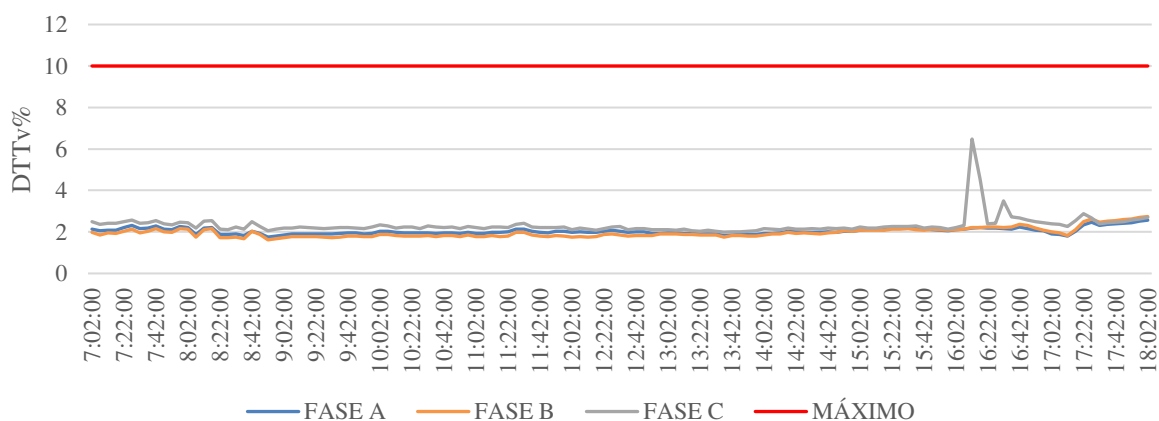


Figura 8. Distorção harmônica total de tensão. (Autoria própria).

Com relação às taxas de Distorção Harmônica Total da Corrente (DTTi%), elas não são pontuadas no Módulo 8 do PRODIST como parâmetro da QEE. Contudo, elas são citadas na norma [8] da concessionária de energia

elétrica local como parâmetro de qualidade de energia. [8] estabelece um limite de até 5% de DTTi%. Por conta disso, a DTTi% foi analisada e a Figura 9 mostra o comportamento da DTTi% monitoradas nas três fases durante a geração do SFCR.

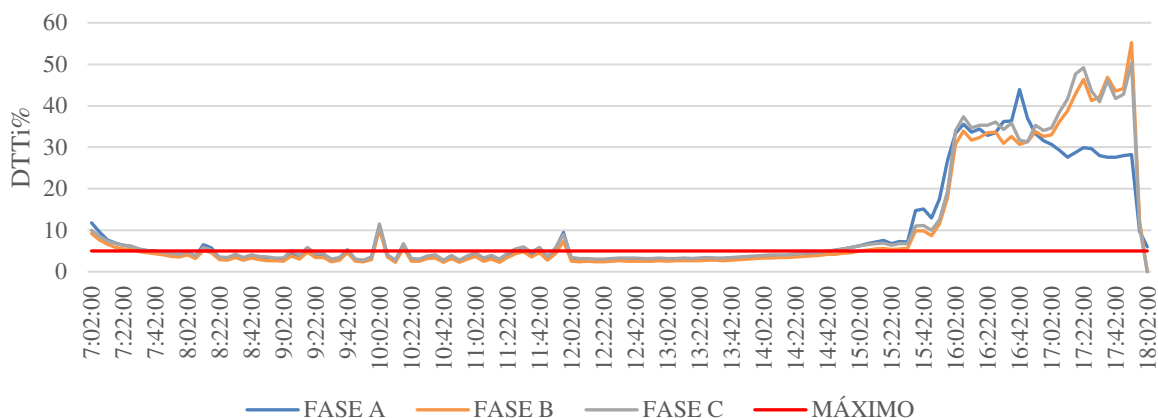


Figura 9. Distorção harmônica total de corrente. (Autoria própria)

Os resultados da Figura 9 indicam uma DTTi% relativamente uniforme entre 08h02min e 15h02min, com exceção dos picos de 11,57%, 6,75% e 9,43% registrados, respectivamente, nos horários de 10h02min, 10h17min e 11h57min. Outra ressalva está na DTTi% apresentada no início e no final do dia, que ultrapassam o limite de 5% estabelecido na norma [8]. Observa-se que no final do dia, por exemplo, picos de 43,91%, 55,22% e 50,30% são atingidos nas fases A, B e C, respectivamente.

Conforme explicado por [15], o aumento da DTTi% no início da manhã e final da tarde, como próximo ao horário de 15h02min, pode ser explicado pelos inversores de frequência variarem sua eficiência e níveis de distorção harmônica de acordo com o nível de carregamento, sendo tipicamente menos satisfatórios quando operam abaixo de 50% da potência nominal. Desta forma, o início da manhã, o final da tarde e o fenômeno de sombreamento são exemplos típicos em que a irradiância solar diminui e, consequentemente, há redução na energia elétrica gerada pelo SFCR. Nessa condição, os inversores passam a operar fora do ponto ótimo, ou até mesmo entram em regime de desligamento parcial, o que compromete a eficácia dos filtros internos e contribui para o aumento da DTTi%.

Ao avaliar o sistema FV como parte da instalação de toda a Universidade, o valor de DTTi% detectado no final da tarde, embora esteja elevado, não gera grande impacto à rede elétrica, pois é perceptível que a corrente nesse horário não passa de 1,3 Ampères (A), ou seja, uma corrente irrisória para a unidade consumidora da UFERSA.

4.5. Desequilíbrio de tensão

O fator de desequilíbrio de tensão (FD%) foi monitorado e o valor máximo registrado foi de 2,233%, permanecendo dentro do limite de 3% (destacado em vermelho na figura 11) estabelecido por [5], conforme é mostrado na Figura 10.

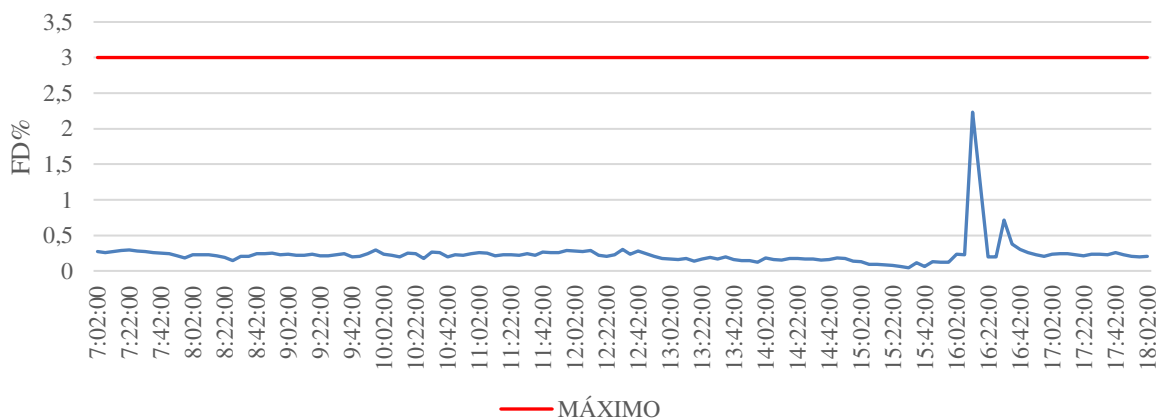


Figura 10. Desequilíbrio de tensão. (Autoria própria)

4.6. Variação de frequência

A Figura 11 apresenta os valores de frequência elétrica monitorados durante o intervalo das 7h02min e 18h02min do dia 28 de janeiro de 2025. As variações observadas oscilaram entre 59,94 Hz e 60,07 Hz, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos por [5], que estabelece uma faixa aceitável entre 59,9 Hz e 60,1 Hz para sistemas de 60Hz. É possível afirmar que a frequência permaneceu estável ao longo do tempo, com média próxima de 60 Hz, o que indica bom desempenho do sistema em relação à estabilidade da rede elétrica.

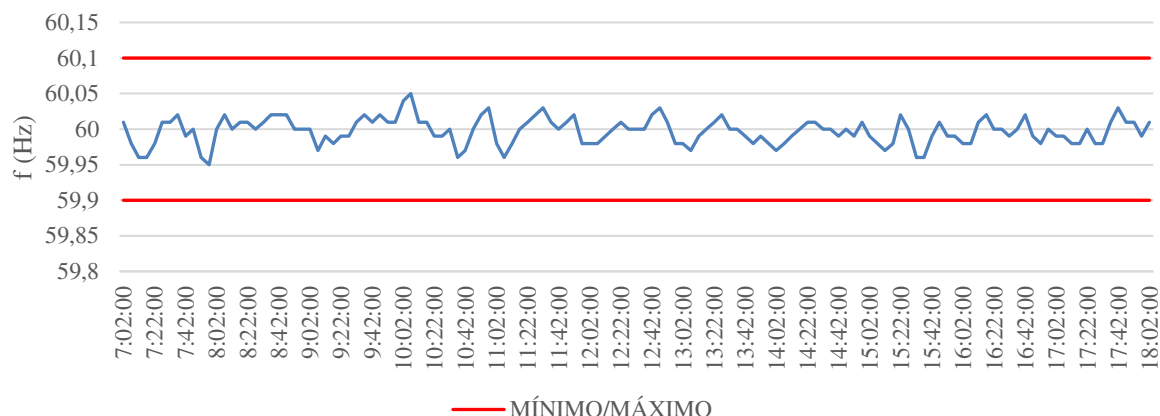


Figura 11. Variação de frequência. (Autoria própria)

4.7. Avaliação da qualidade de energia elétrica do sistema após 7 anos de operação

Ao final da análise dos dados, a Tabela 4 apresenta um estudo comparativo dos principais parâmetros elétricos relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), extraídos da planta FV estudada no presente trabalho, entre os horários de 7h02min e 16h22min, intervalo que corresponde ao mesmo horário analisado por [6]. Esses dados foram comparados com aqueles obtidos em 2018, ou seja, no primeiro ano de funcionamento do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) do Laboratório de Engenharia I, conforme tratado por [6]. Foram considerados os valores máximos, médios e mínimos em ambas as medições, com o objetivo de facilitar a comparação entre os dois períodos analisados.

Tabela 4. Comparativo dos parâmetros elétricos medidos neste estudo (ano 2025) e em [6] (ano 2018). (Autoria própria)

	Dados 2025			Dados 2018		
	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo
Potência ativa (KW)	12,44	8,00	1,30	7,60	-	-
Potência reativa (KVAR)	- 0,15	- 0,14	-0,06	-3,30	-	-
Potência aparente (KVA)	12,44	12,44	1,30	8,10	-	-
Fator de potência	1,00	0,99	0,99	0,98	0,76	-
Distorção harmônica de tensão (%)	3,07	2,62	1,95	4,56	-	-
Distorção harmônica de corrente (%)	34,09	5,03	2,75	4,28	-	-
Tensão fase A (V)	232,50	226,36	219,70	234,20	227,90	220,30
Tensão fase B (V)	231,70	225,90	220,20	234,00	227,36	218,50
Tensão fase C (V)	233,50	226,50	209,10	234,10	227,08	219,00
Desequilíbrio de tensão (%)	2,23	0,18	0,03	1,88	0,31	-
Variação de frequência (HZ)	60,07	60,00	59,94	60,10	60,00	59,80

Na Tabela 4, ao comparar os níveis de tensão em regime permanente de todas as três fases no ponto de conexão do inversor com a rede elétrica, observa-se que não houve discrepâncias relevantes entre os dois anos analisados, evidenciando um comportamento similar do perfil de tensão entre os dois estudos.

Com relação às potências ativa, reativa e aparente, ao observar a Tabela 4 nota-se uma diferença significativa entre as potências medidas no primeiro e no sétimo ano de funcionamento do sistema fotovoltaico. A geração registrada em Janeiro/2025, mês da coleta deste estudo, foi consideravelmente superior à obtida por [6], em

Agosto/2018, especialmente no que diz respeito à potência ativa. Esse fato pode ser justificado pelo sistema FV estar trabalhando com 44 módulos fotovoltaicos no ano de 2018 e, no período analisado no presente trabalho, 48 módulos FV estão instalados e em uso, outro ponto foi o período das coletas, que foram realizadas em meses diferentes. Além disso, a potência reativa medida neste trabalho foi menor, sugerindo uma menor compensação capacitiva.

Agora, comparando os valores de fator de potência da Tabela 4, percebe-se que foram detectadas variações com máximas de 0,98 e média de 0,76 por [6] no ano de 2018. Na medição atual, considerando o mesmo intervalo de medição, os valores tiveram uma variação irrisória, ou seja, um fator de potência mais constante e sempre dentro dos limites das normas vigentes.

Levantando o perfil de consumo do Laboratório de Engenharias I nos dois anos, constatou-se que a ausência de atividades no Laboratório *Cactus* Baja no período de análise e uma mudança no perfil de consumo corroboraram para o fator de potência se manter constantemente unitário. Isto ocorre, pois as atividades da Engenharia Mecânica requerem o uso de equipamentos e máquinas que frequentemente incorporam motores elétricos, transformadores e outros componentes indutivos. Esses equipamentos são conhecidos por demandar potência reativa da rede para criar os campos magnéticos necessários ao seu funcionamento.

Quando comparados aos resultados das distorções harmônicas da Tabela 04, há uma similaridade nos valores de DTTv%. Em contrapartida, [6] verificou um valor máximo de 4,28% de DTTi%, enquanto no presente trabalho, o DTTi% atingiu o pico de 34,09% no mesmo horário de análise.

Ao comparar os resultados de desequilíbrio de tensão, percebeu-se valores máximos semelhantes. No entanto, a média registrada por [6] foi, aproximadamente, o dobro da medida neste estudo, conforme mostra a Tabela 04. Isso pode indicar diferenças no perfil de carga ou nas condições operacionais do sistema analisado.

Finalmente, avaliando os dados de variação de frequência, percebe-se que os dois estudos apresentaram comportamento semelhante. Contudo, os dados deste trabalho demonstram uma menor dispersão e menos ocorrências de desvios momentâneos, reforçando a consistência da frequência durante o período analisado.

Dessa forma, os resultados apresentados no presente trabalho coerência e constância nos valores dos parâmetros, reforçando a confiabilidade dos dados coletados e a validade do procedimento metodológico adotado. As análises permitiram alcançar os objetivos propostos, especialmente no que se refere à avaliação da qualidade de energia do sistema fotovoltaico após sete anos de operação. Considerando os pontos discutidos neste Item, prossegue-se, a seguir, para a conclusão do trabalho (Item 5), na qual serão sintetizados as principais avaliações e suas implicações.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade de energia elétrica de um (SFCR) instalado no prédio do Laboratório de Engenharia I da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). A partir dos dados coletados durante o monitoramento, foi avaliado os parâmetros de QEE estabelecidos em norma e, posteriormente, realizado uma comparação com os resultados obtidos por [6] no primeiro ano de funcionamento do SFCR, ou seja, em 2018.

A geração de potência ativa, reativa e aparente mostrou-se estável e eficiente, com o fator de potência permanecendo unitário, indicando uma injeção otimizada de potência ativa na rede. A Distorção Harmônica Total de Tensão (DTTv%), o desequilíbrio de tensão e a variação da frequência mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, assim comprovando uma alta estabilidade da energia elétrica.

Contudo, embora os níveis de tensão tenham se mantido adequados na maior parte do tempo, os picos registrados, classificados como precários pela PRODIST, são um indicativo de que a capacidade de suporte da rede pode ser excedida em condições de alta geração. Assim, a presença de tensões na faixa precária precisa ser corrigida para garantir a segurança dos equipamentos e atender os critérios normativos. Ajustar as configurações dos inversores do sistema FV é a solução mais rápida e acessível.

Com relação a Distorção Harmônica Total de Corrente (DTTi%), esse parâmetro apresentou um aumento significativo em períodos de baixa irradiação solar, especialmente após as 15h02min, superando os valores estabelecidos pela norma da concessionária local [8], contudo, esse não é um parâmetro avaliado pelo Módulo 8 do PRODIST. O aumento da DTTi% pode ser atribuído à redução da energia gerada, que ocorre quando há diminuição da irradiação, como no início e final do dia. Essa redução de potência ativa provoca a operação dos inversores em níveis de carregamento abaixo do ideal, o que compromete a eficácia dos filtros internos e eleva a distorção harmônica. Embora os valores de DTTi% ultrapassem os limites estabelecidos pela norma [8], tal comportamento não se configurou como fator crítico neste estudo, uma vez que as correntes registradas nessas condições permaneceram abaixo de 1,3 A. Dentro do sistema de distribuição da Universidade em que o sistema FV está instalado, esse nível de corrente é considerado pouco significativo, o que reforça a baixa influência prática da distorção harmônica de corrente na rede elétrica. Ademais, essa situação poderia ser reduzida, ou até consumada, por meio do desligamento programado do inversor em um horário mais cedo, como o horário em que a irradiação solar já se encontra consideravelmente reduzida.

Em suma, o sistema fotovoltaico em questão demonstra uma boa performance na qualidade da energia após sete anos de funcionamento, mesmo com a DTTi% apontando algumas ultrapassagens de valores, visto que é uma

condição específica esperada quando há redução de energia gerada. A manutenção dos demais parâmetros dentro dos limites normativos reforça a viabilidade e a estabilidade de longo prazo de SFCR, ressaltando a importância do monitoramento contínuo para identificar e sanar problemas pontuais.

Ainda que os dados obtidos nesta pesquisa tenham apresentado uma boa avaliação quanto aos indicadores de QEE no SFCR, recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de estudos ao longo de um período de tempo mais extenso, incluindo o funcionamento do Laboratório Cactus Baja. Além disso, recomenda-se desligar o inversor mais cedo e verificar o comportamento dos parâmetros afetados, como DTTi% e fator de potência.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023#:~:text=Entre%20janeiro%20e%20setembro%20de,janeiro%20e%20setembro%20de%202023.> Acesso em: 9 jul. 2025.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – ABSOLAR. *Energia solar bate recorde em 2024*. 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-estadao-com-br-economia-energia-solar-bate-recorde-em-2024-nprei/>. Acesso em: 21 jul. 2025.
- [3] ROPP, M. E.; GONZALEZ, S. *Development of a MATLAB/Simulink model of a single-phase grid-connected photovoltaic system*. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 24, n. 1, p. 195–202, mar. 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6939147>. Acesso em: 21 jul. 2025.
- [4] BORGES, Caio Franco. *Análise da qualidade da energia elétrica em um sistema fotovoltaico conectado à rede*. 2019. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2019.
- [5] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Versão 13. Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_prodist_modulo_8_v13.pdf. Acesso em: 9 jul. 2025.
- [6] BANDEIRA, Silvo de Lima et al. Analysis of the Power Quality of a Grid Connected Photovoltaic System. *IEEE Latin America Transactions*, Mossoró, v. 18, n. 8, p. 714–721, abr. 2020.
- [7] OLIVEIRA, Beatriz Karine Alves de. *Análise estatística de qualidade de energia em um sistema fotovoltaico da UFERPA Campus Pau dos Ferros*. 2023. 80 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2023.
- [8] NEOENERGIA. DIS-NOR-031: Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição. Aprovador: Ricardo Prado Pina. Rev. 01. [S. l.]: Neoenergia, 22 fev. 2022
- [9] ALDABÓ, R. Qualidade na energia elétrica. São Paulo: Artliber, 2001. 252 p. ISBN 85-88098-02-4.
- [10] SOUSA, Pedro Vítor de Moraes e. *Análise de impactos na qualidade de energia elétrica decorrentes da inserção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição*. 2023. 63 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2023.
- [11] KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. *Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica*. [S.l.]: Editora Blucher, 2009.
- [12] ABB. ABB string inverters PVI-10.0-TL-OUTD. 2018. Disponível em: <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=BCD.00378&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. Acesso em: 19 ago. 2018.
- [13] MINIPA do Brasil. Analisador de Qualidade de Energia ET-5061C: Manual de Instruções. São Paulo: Minipa, 2011.
- [14] ELSEROUGI, Ahmed Abbas; ABDEL-KHALIK, Ayman Samy; MASSOUD, Ahmed M.; AHMED, Shelab. A Simple Active-Power Control Technique for Grid-Connected Three-Phase Inverters at Unity Power Factor. In: *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (PowerEng), 2013 Fourth International Conference on*, p. 265–270, maio 2013.
- [15] Macêdo, Wilson Negrão. *Análise do fator de dimensionamento do inversor (FDI) aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR)*. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [16] NUNES, Evandro Ailson de Freitas. *Análise de Impactos na Rede de Distribuição de Energia Elétrica Decorrentes da Inserção de Sistemas de Geração Fotovoltaicos*. 2017. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.