

# Analysis of the Power Quality of a Grid-Connected Photovoltaic System

S. Bandeira, R. Vieira, and M. Guerra

**Abstract**—The use of Grid-Connected Photovoltaic Systems is increasingly on the rise in Brazil. Faced with this growth, it is necessary to evaluate the impacts of this source in the electric energy systems. Based on this scenario, the present work aims to analyze and quantify the impact of a grid-connected photovoltaic system connection, evaluating the Electric Power Quality indicators based on the levels specified in Module 8 of the Electric Energy Distribution Procedures in the National Electric System. To perform the data collection, an energy analyzer device was installed at the output of the grid-connected system inverter located in the Energy Laboratory of the Federal Rural Semi-Arid University, located in the city of Mossoró-RN. Using the collected data, it was possible to analyze parameters of voltage and current distortion, power factor, active, reactive and apparent power, voltage, frequency variations, and voltage unbalance. It was observed that the criteria analyzed were within the appropriate standards although there were also verified cases that there was an elevation in tension levels. Finally, it is concluded that the impacts caused are relevant within the electric system, and grid connected system performance was satisfactory, although there are still possibilities for improvements.

**Index Terms**—Photovoltaic System, Grid-Connected, Distributed Generation, Power Quality, Renewable Energy.

## I. INTRODUÇÃO

A utilização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) está cada vez mais comum no Brasil, sobretudo após Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicar a Resolução Normativa (RN) nº 482/2012, que estabelece condições para o acesso de micro e mini geração distribuída, além dos grandes investimentos em pesquisas e tecnologia no setor.

Segundo o BIG (Banco de Informações de Geração) o Brasil tem 2471 empreendimentos de geração fotovoltaica entre mini e micro geração distribuída, totalizando aproximadamente 2 GW de capacidade instalada até o ano de 2018, e mais 3 GW autorizados, mas ainda para entrar em operação [1]. Entretanto, esse aumento significativo de SFCRs pode trazer algumas dificuldades para as concessionárias, principalmente no que diz respeito à da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) entregue por esses sistemas [2].

O impacto causado pela inserção fotovoltaica nos sistemas de distribuição de energia elétrica no mundo e no Brasil tem se tornado mais preocupante com a previsão de crescimento da sua capacidade instalada. A literatura recente aborda os conceitos de conexão com a rede e suas implicações de diversas maneiras [3–6].

Em [7] foi pesquisado sobre os excedentes reativos de SFCRs, considerando que este pode vir a ser um empecilho à disseminação desta tecnologia. O estudo fez um levantamento comparando o fator de potência da instalação antes e após a inserção do SFCR. Para tal, os autores criaram três cenários fixando o fator de potência antes da conexão do sistema de geração à rede. Ao final, foi possível observar que para a instalação permanecer dentro do padrão normativo a potência ativa consumida pela instalação deve ser aproximadamente 2,5 vezes maior ou igual que a potência reativa demandada por essa mesma instalação. O estudo também concluiu a necessidade de regulamentação sobre indicadores de qualidade da energia nesse tipo de sistema fotovoltaico.

Diante deste cenário estudos vêm sendo desenvolvidos, com o objetivo de analisar e quantificar o impacto da inserção de sistemas fotovoltaicos na rede de distribuição.

Em [8], os autores analisaram as distorções harmônicas em um sistema de geração distribuída utilizando fontes de energia solar e eólica conectado à rede. Os dados indicaram taxas de distorção harmônica significativas, que produziram impacto na qualidade da energia gerada.

Em contrapartida, os autores [9] analisaram um SFCR operando com inversores de diferentes fabricantes e topologias. O sistema era composto por 252 módulos de 130 Wp cada, conectados à rede por 5 inversores. Os resultados indicaram que a qualidade da energia gerada estava dentro dos padrões estabelecidos pela norma.

Leite, *et al.* [10] analisaram a qualidade da energia gerada em um SFCR de 3,38 kWp, instalado em um escritório comercial e conectado à rede de distribuição secundária. O estudo avaliou os parâmetros de distorções harmônicas totais e individuais e apresentou uma visão geral de avaliação para sistemas conectados à rede. As análises permitiram concluir que todos os indicadores avaliados atendiam às normas vigentes.

Beliski, *et al.* [11] compararam dois sistemas fotovoltaicos instalados, o primeiro com 1,25 kWp e o segundo com 4,16 kWp. A pesquisa buscou medir, monitorar e avaliar parâmetros da qualidade de energia, tais como distorções harmônicas de tensão e corrente, fator de potência e potência reativa. O estudo concluiu que ambos os sistemas analisados sofriam variações na taxa de distorção harmônica de corrente de acordo com o nível de irradiância incidente.

S. L. Bandeira, Federal Rural University of Semi-Arid (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil, (email: silvio-bandeira@hotmail.com).

R. G. Vieira, Federal Rural University of Semi-Arid (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil, (email: romenia.vieira@ufersa.edu.br).

M. I. S. Guerra, Federal Rural University of Semi-Arid (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil, (email: izabel.guerra@ufersa.edu.br).

Apesar das variações, os SFCRs geraram energia de qualidade dentro do que rege as normas.

Dado as experiências valiosas e o *feedback* contínuo da literatura, evidencia-se a necessidade de avaliação do impacto causado pela inserção de SFCR na rede de distribuição local.

Este trabalho busca analisar e quantificar o impacto da após a inserção de um SFCR, realizando um estudo da qualidade de energia após a instalação de um sistema de geração fotovoltaica de 14kWp no Laboratório de Energia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)/Mossoró-RN, cuja carga instalada é de 54,64 kVA.

O principal objetivo deste estudo é verificar seus indicadores de qualidade de energia elétrica segundo as normas do padrão nacional Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) e averiguar se, após a inserção do pequeno SFCR, haverá algum parâmetro que se comportará negativamente de modo a comprometer a qualidade de energia fornecida à rede.

Adicionalmente, o estudo busca verificar os impactos negativos significativos, conforme hipótese levantada por [7], avaliando se houve redução do fator de potência da instalação, que levaria à cobrança de reativos. A pesquisa ainda pretende verificar se os dispositivos dimensionados para este sistema atendem as condições da norma vigente.

O artigo está estruturado em seções, em que a Seção II discute o conceito de qualidade de energia e quais são os indicadores avaliados neste estudo. Em seguida, a Seção III apresenta a metodologia do trabalho, detalhando os procedimentos para aquisição de dados. Na Seção IV são apresentados e discutidos os resultados encontrados, e por fim na Seção V as conclusões sobre o estudo são apresentadas.

## II. QUALIDADE DE ENERGIA

Devido ao desenvolvimento da eletrônica de potência e do avanço tecnológico que o setor de energia elétrica vem passando nos últimos anos, o perfil de carga e os hábitos dos consumidores mudaram significativamente. Desta forma, a exigência por uma melhor qualidade de energia elétrica tem se tornado cada vez maior.

Problemas com a qualidade da energia elétrica ocasionam alguns distúrbios no sistema, podendo comprometer o fornecimento de eletricidade, causar danos aos equipamentos e insegurança aos usuários [12].

Diante deste contexto, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) propõe algumas medidas para normatizar e padronizar a QEE no país. Através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) no seu Módulo 8, a ANEEL busca estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações [13].

Os critérios relacionados a qualidade do produto, tanto em regime permanente como em regime transitório estão estabelecidos na TABELA I.

Utilizando-se também como base as definições e conceitos do Módulo 8 do PRODIST, alguns desses critérios são tratados individualmente a seguir.

TABELA I

CRITÉRIOS DE QUALIDADE EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO

Permanente	Transitório
i. tensão em regime permanente;	i. variações de tensão de curta duração – VTCD.
ii. fator de potência;	
iii. harmônicos;	
iv. desequilíbrio de tensão;	
v. flutuação de tensão;	
vi. variação de frequência.	

### A. Fator de Potência

O fator de potência (FP) pode ser definido como a diferença de fase entre as ondas de tensão e corrente. Ele pode ser calculado através da razão entre a potência ativa (P) e a aparente (S) [11]. E em situações em que há presença de distúrbios na rede, o FP pode ser calculado com o auxílio da Taxa de Distorção Harmônica da Corrente (TDH<sub>i</sub>), estabelecida em (1).

$$FP = \frac{\cos\phi_1}{\sqrt{1 + TDH_i^2}} \quad (1)$$

em que:

FP Fator de potência;

$\cos\phi_1$  Relação entre a potência ativa e potência aparente da harmônica fundamental;

TDH<sub>i</sub> Taxa de distorção harmônica de corrente.

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1 indutivo ou 1 e 0,92 capacitivo, de acordo com regulamentação vigente.

### B. Distorções Harmônicas

Os harmônicos são capazes de quantificar as distorções nas formas de onda de tensões e correntes elétricas, caracterizadas por sinais senoidais com frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental e sua presença pode ser feita através do tratamento individual ou total das mesmas [14].

Com o objetivo de quantificar a qualidade dos sinais são utilizados dois critérios, a distorção harmônica individual (DIT<sub>h</sub>) e a distorção harmônica total de tensão (DTT). A primeira pode ser definida como uma grandeza que expressa o nível individual de uma das componentes que totalizam o espectro de frequências de um sinal distorcido e a segunda representa uma composição das distorções harmônicas individuais que expressa o grau de desvio da onda em relação ao padrão ideal [7]. As taxas de DIT<sub>h</sub> e DTT da tensão estão definidas em (2) e (3).

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_2^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (3)$$

em que:

h ordem harmônica;

$h_{\max}$  ordem harmônica máxima;

$V_h$  tensão harmônica de ordem h;

$V_1$  tensão de frequência fundamental.

Os limites de distorções harmônicas totais de tensão são definidos pelo Módulo 8 da PRODIST e representados pela TABELA II.

TABELA II  
LIMITE DAS DISTRORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS DE TENSÃO (% DA TENSÃO FUNDAMENTAL)

Indicador	Tensão Nominal (kV)		
	$V_n \leq 1$	$1 < V_n < 69$	$69 \leq V_n < 230$
Distorção harmônica total de tensão (DTT%)	10,0 %	8,0%	5,0%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTT <sub>p</sub> %)	2,5%	2,0%	1,0%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTT <sub>i</sub> %)	7,5%	6,0%	4,0%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT <sub>3</sub> %)	6,5	5,0%	3,0%

### C. Tensão em Regime Permanente e Desequilíbrio de Tensão

No Módulo 8 do PRODIST são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente. A distribuidora deve dotar-se de recursos e técnicas modernas para tal acompanhamento, atuando de forma preventiva para que a tensão em regime permanente se mantenha dentro dos padrões adequados. A Fig. 1 indica as faixas de tensão de leitura em relação à tensão de referência estudada neste trabalho.

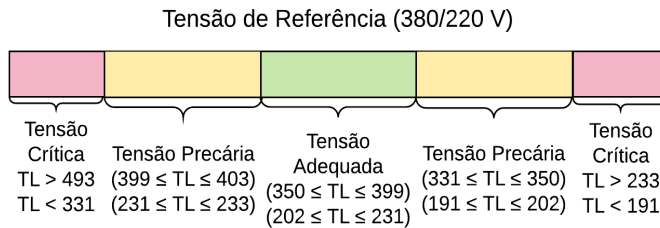


Fig. 1. Faixas de Tensão de Leitura (TL) em Relação à Referência.

O desequilíbrio em um sistema elétrico é o fenômeno em que as três fases apresentam diferentes valores dos módulos das tensões ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos [15]. A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão é mostrada em (4):

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (4)$$

em que:

- FD Fator de desequilíbrio de tensão;  
 $V_-$  tensão eficaz de sequência negativa;  
 $V_+$  tensão eficaz de sequência positiva.

Alternativamente, pode-se utilizar (5) e (6), que conduz a resultados em concordância com (4):

$$FD\% = 100 \frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (6)$$

Em que  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  são as tensões eficazes de linha.

Os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão estão apresentados na TABELA III.

TABELA III  
LIMITES PARA OS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

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

### D. Variação de Frequência

O Módulo 8 do PRODIST determina que em sistemas de distribuição e em instalações de geração conectadas à rede, em condições normais de operação e em regime permanente, devem operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

Na ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne, no intervalo de tempo de 30 segundos após a ultrapassagem, para a faixa entre 59,5 Hz e 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

Durante distúrbios no sistema de distribuição, a frequência:

- Não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
- Pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos;
- Pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos.

Os critérios demonstrados anteriormente serão utilizados para analisar e quantificar indicadores da qualidade de energia elétrica. Os métodos e procedimentos adotados nesses estudos serão discutidos na Seção III.

## III. METODOLOGIA

Neste trabalho será analisado o desempenho de um SFCR em relação à qualidade da energia. O sistema está instalado no Laboratório de Energia da unidade consumidora Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) na cidade de Mossoró-RN. O prédio tem uma carga instalada de 54,64 kVA e está conectado à rede de distribuição própria da unidade consumidora. A instalação é atendida por um transformador de 13.800/380-220V e 75kVA.

Os níveis de tensão e corrente foram verificados por [16] antes da instalação do SFCR e foi atestado que estavam adequados para a instalação. Os demais parâmetros de qualidade da energia não foram avaliados, porém não comprometem o objetivo dessa pesquisa, que é verificar se há comportamento negativo de algum parâmetro da rede após a inserção do SFCR.

O sistema fotovoltaico estudado possui 42 módulos fotovoltaicos do fabricante *Canadian Solar*, modelo CS6U-325P, 325 Wp, totalizando uma potência instalada de 14 kWp. Para a conversão da corrente contínua para alternada são utilizados dois inversores de 10 kW de potência cada.

A TABELA IV mostra um resumo das principais características do inversor [17] e a Fig. 2 apresenta um diagrama unidirecional do sistema estudado.

Para realizar a coleta de dados foi utilizado o analisador de energia elétrica do fabricante TES, modelo 3600N, acoplado na saída do inversor. Segundo o manual do fabricante [18] o

equipamento possui uma taxa de 64 amostras/ciclo com precisão de leitura de 1%.

TABELA IV  
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS INVERSOR ABB PVI-10.0-TL-OUTD

Corrente Contínua Máxima ( $I_{DCmax}$ )	34 A
Tensão Contínua de Entrada ( $V_{DC}$ )	220V - 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 kW

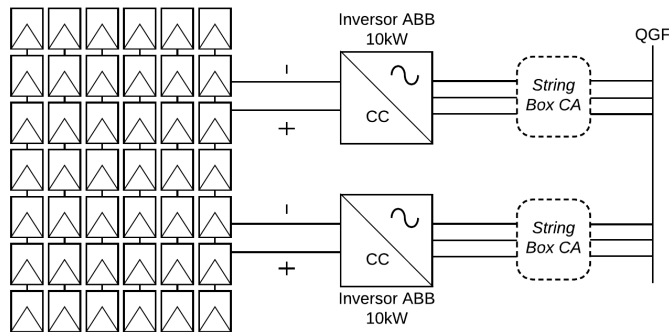


Fig. 2. Diagrama Unidirecional do Sistema

A Fig. 3 representa o esquema de ligação trifásica a 4 fios utilizado nas medições [18]. O analisador foi configurado para registrar os dados de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e potência aparente, componentes harmônicas e fator de potência em um ciclo de armazenamento de 30 segundos, durante um mês.

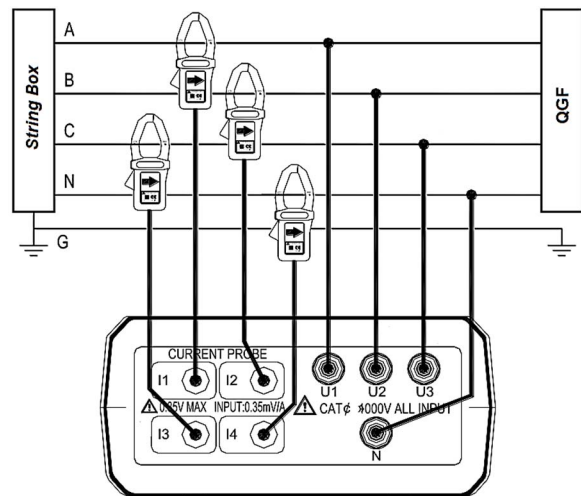


Fig. 3. Diagrama de Conexão do Sistema de Medição [18].

Após a coleta dos dados pelo analisador, estes foram compilados para o computador. Para o tratamento dos dados e desenvolvimento dos gráficos foram utilizados os softwares Microsoft EXCEL® e Matlab®,

Para fins de análise nesta pesquisa, os dados coletados durante os 30 dias foram sintetizados e apresentados em gráficos e/ou tabelas. Os dados foram escolhidos de modo a refletir o comportamento observado no sistema ao longo da pesquisa. Por exemplo, nas análises de potência, fator de potência e distorção

harmônica os gráficos ilustram apenas um dia de medição, pois este foi o comportamento Observado em todos os dias de medição. Os resultados serão apresentados e discutidos na Seção IV. Os resultados serão apresentados e discutidos na Seção IV.

IV. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados das medições, avaliando os indicadores da QEE da rede após a inserção de um sistema de geração fotovoltaica.

A. Análise das Potências

O analisador de energia elétrica coletou dados de potências ativa, reativa e aparente como ilustram as Fig. 4, Fig. 5 e Fig. 6. As medições mostraram o comportamento do sistema ao longo de um dia escolhido para representar os dados coletados.

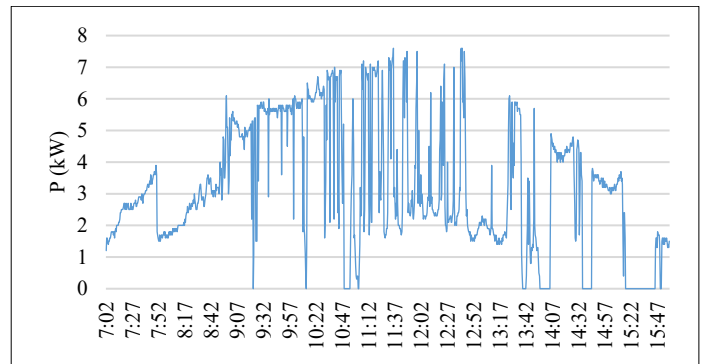


Fig. 4. Potência Ativa ao Longo do Dia.

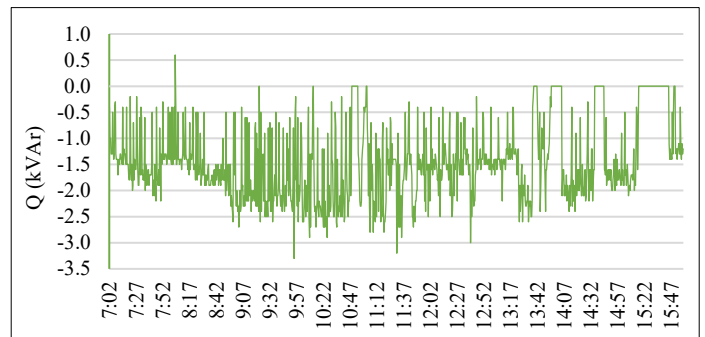


Fig. 5. Potência Reativa ao Longo do Dia.

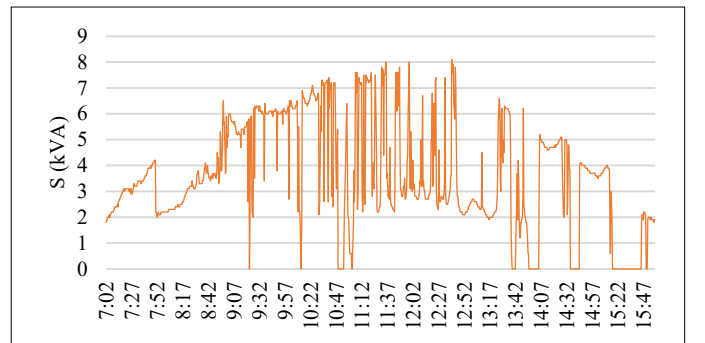


Fig. 6. Potência Aparente ao Longo do Dia.

A geração de energia do sistema deu-se no período de 7:00 às 16:00, aproximadamente, quando o sol já estava se pondo e a inclinação do telhado impossibilitou a incidência de raios solares sobre os módulos.

Nas Fig. 4, Fig. 5 e Fig. 6 é possível observar que as curvas variam bastante ao longo do dia, apresentando pontos altos e baixos em diversos horários. Na Fig. 4, observa-se que a potência ativa atinge valores máximos no intervalo entre 11:00 e 12:00, pois este é o horário de maior irradiância. Entretanto, nota-se quedas abruptas da potência ativa gerada. Tal comportamento pode ser explicado devido à grande presença de nuvens na região.

Durante o período de medição, a potência ativa, reativa e aparente chegaram a atingir aproximadamente 7,6 kW, -3,3 kVAr e 8,1 kVA respectivamente e uma média aproximada de 3,17 kW, -1,43 kVAr e 3,58 kVA ao longo do dia.

Quanto a potência reativa, analisando a Fig. 5 pode-se notar que esta assume valores negativos, isso significa que o sistema fotovoltaico está fornecendo potência reativa para a rede. Este desempenho deve-se ao fato de os inversores estarem trabalhando com FP capacitivo.

Essa prática permite uma geração de potência reativa de forma a compensar a demanda de reativos da unidade consumidora. Entretanto, pode causar aumento da tensão no ponto de conexão, provocado pelo fluxo de potência no sentido do gerador para a rede e, conseqüentemente, causar desligamentos [6].

Analisando a Fig. 6, observa-se que o comportamento da potência aparente acompanha o comportamento da potência ativa. Este desempenho é esperado, considerando que a potência de saída de um sistema fotovoltaico é diretamente influenciada pela irradiância sobre os painéis.

### B. Fator de Potência (FP)

Durante o mesmo dia foram analisados os valores referentes ao fator de potência, como ilustra a Fig. 7. Nesse período foram registrados os valores mínimo de 0,63, máximo 0,98 e uma média de 0,76 de fator de potência capacitivo.

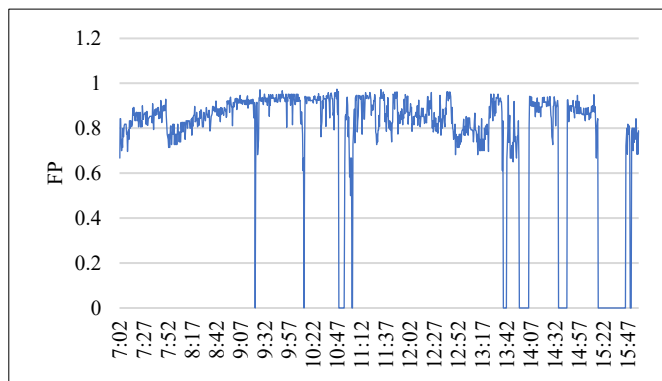


Fig. 7. Fator de Potência ao Longo do Dia.

Observa-se na Fig. 7 que o FP chega a zero em alguns momentos do dia. Tal comportamento é notado nos mesmos instantes em que a potência ativa é zero na Fig. 4, ou seja, significa que a irradiância incidente sobre os painéis FV chegou a níveis muito baixos e não houve geração nesses momentos.

O FP é uma variável que é influenciada pela potência nominal do inversor, que quanto mais próximo de sua potência máxima o sistema conseguir operar, maior será o FP e maior será a energia ativa proporcional injetada na rede, como pode ser identificado na Fig. 8. O SFCR analisado opera com inversores sobredimensionados, o que ocasiona um FP abaixo do

adequado em diversos momentos [10]. Por outro lado, os inversores sobredimensionados permitem que sistema injete potência reativa na rede, o que pode ser interessante para correção do FP da instalação em alguns casos.

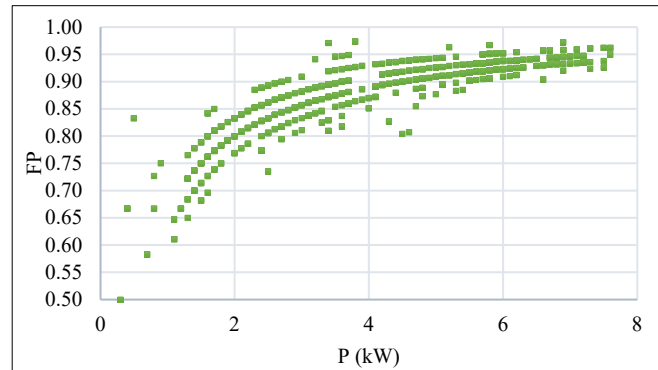


Fig. 8. Fator de Potência em Função da Potência Ativa.

O comportamento observado na Fig. 8, ou seja, o FP abaixo do recomendando pode vir a causar elevações na tensão da rede devido ao fluxo de corrente no sentido do sistema para a rede [7].

### C. Distorção Harmônica Total de Tensão ( $DTT_v$ %)

O comportamento dos perfis de distorção harmônica total das tensões, nas três fases, foram monitoradas durante o período de análise do SFCR. A Fig. 9 ilustra o desempenho da deste parâmetro ao longo de um dia escolhido para representar os dados coletados. Os níveis de  $DTT_v$  apresentaram poucas variações ao longo do dia, tendendo a valores aproximadamente constantes, isso se deve principalmente ao fato desse parâmetro ser influenciado pela rede de distribuição que também tende a manter os valores de tensão constantes.

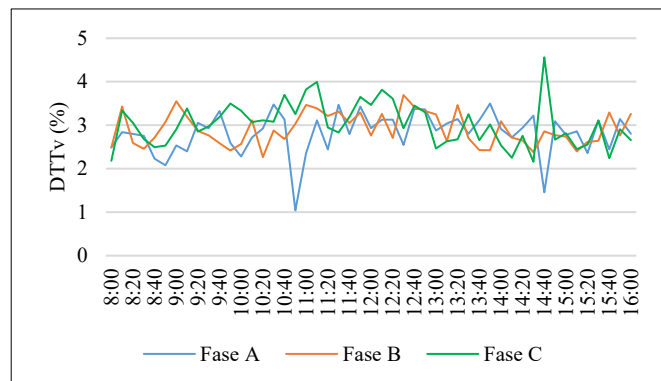


Fig. 9. Distorção Harmônica Total de Tensão.

Também observa-se na Fig. 9 que os níveis de distorção harmônica são inferiores a 10%, em conformidade com o PRODIST Módulo 8, atingindo valor máximo de 4,56 %. A TABELA V, TABELA VI e TABELA VII trazem o resumo dos valores  $DTT\%$ ,  $DTT_p\%$ ,  $DTT_1\%$  e  $DTT_3\%$  medidos em cada fase.

Analisando a TABELA V, TABELA VI e TABELA VII é possível atestar que os valores de distorção  $DTT\%$ ,  $DTT_p\%$ ,  $DTT_1\%$  e  $DTT_3\%$  estão todos dentro do limite estabelecidos pela norma.

TABELA V  
VALORES MÁXIMOS E DE P95% DA DTT%, DTT<sub>p</sub>%, DTT<sub>i</sub>% E DTT<sub>3</sub>% - FASE A

	Valores Máximos	P95%	Limite de Distorção %
DTT%	3,50	3,45	10,0 %
DTT <sub>p</sub> %	1,87	1,66	2,5%
DTT <sub>i</sub> %	3,01	2,85	7,5%
DTT <sub>3</sub> %	1,49	1,39	6,5%

TABELA VI  
VALORES MÁXIMOS E DE P95% DA DTT%, DTT<sub>p</sub>%, DTT<sub>i</sub>% E DTT<sub>3</sub>% - FASE B

	Valores Máximos	P95%	Limite de Distorção %
DTT%	3,69	3,46	10,0 %
DTT <sub>p</sub> %	1,75	1,62	2,5%
DTT <sub>i</sub> %	3,26	2,88	7,5%
DTT <sub>3</sub> %	1,68	1,55	6,5%

TABELA VII  
VALORES MÁXIMOS E DE P95% DA DTT%, DTT<sub>p</sub>%, DTT<sub>i</sub>% E DTT<sub>3</sub>% - FASE C

	Valores Máximos	P95%	Limite de Distorção %
DTT%	4,56	3,81	10,0 %
DTT <sub>p</sub> %	2,14	1,57	2,5%
DTT <sub>i</sub> %	3,47	3,34	7,5%
DTT <sub>3</sub> %	3,39	1,44	6,5%

D. Distorção Harmônica Total de Corrente (DTT<sub>i</sub>)

O comportamento dos perfis de distorção harmônica total de corrente, nas três fases, foram monitoradas durante o período de análise do SFCR. A Fig. 10 mostra o desempenho dos perfis de DTT<sub>i</sub>. Os resultados mostraram uma DTT<sub>i</sub> máxima de 4,28%, 3,72% e 3,92% nas fases A, B e C respectivamente. Os valores respectivos de P95% são de 3,66%, 3,12% e 3,15%.

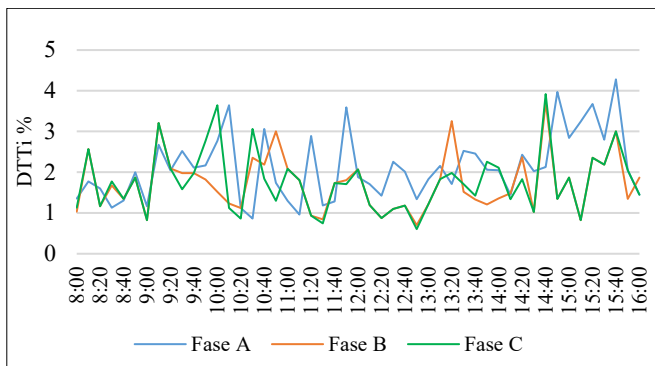


Fig. 10. Distorção Harmônica Total de Corrente.

O Módulo 8 do PRODIST, que é a norma a ser obedecida, não estabelece um limite máximo de distorção harmônica total de corrente. Entretanto, pode-se observar pela Fig. 10 que as taxas de DTT<sub>i</sub> são semelhantes entre as fases. Quando comparadas as Fig. 4 e Fig. 10, nota-se que ocorre elevação da distorção harmônica de corrente nos períodos do dia em que é registrado uma diminuição da potência ativa em função da nebulosidade do local estudado.

E. Tensão em Regime Permanente

Este ensaio buscou avaliar os níveis de tensão em regime permanente das três fases no ponto de conexão dos inversores

com a rede elétrica. Para fins de análise, os dados foram sintetizados aqui em um período três dias. Os resultados são apresentados em

Fig. 11, Fig. 12, e Fig. 13.

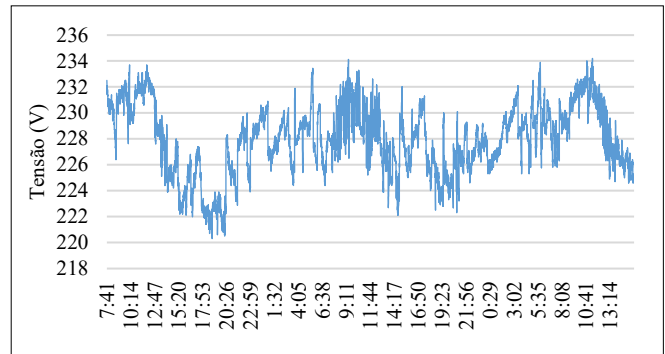


Fig. 11. Tensão em Regime Permanente Fase A.

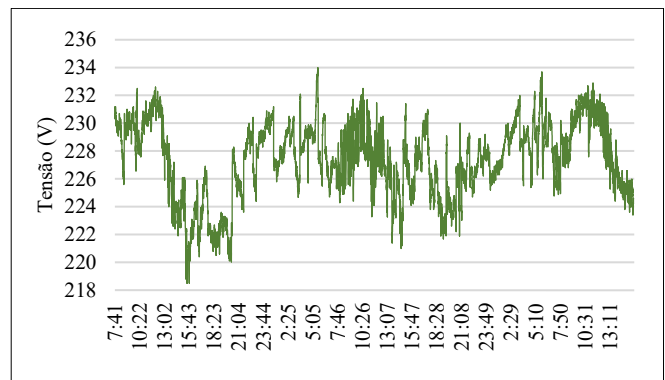


Fig. 12. Tensão em Regime Permanente Fase B.

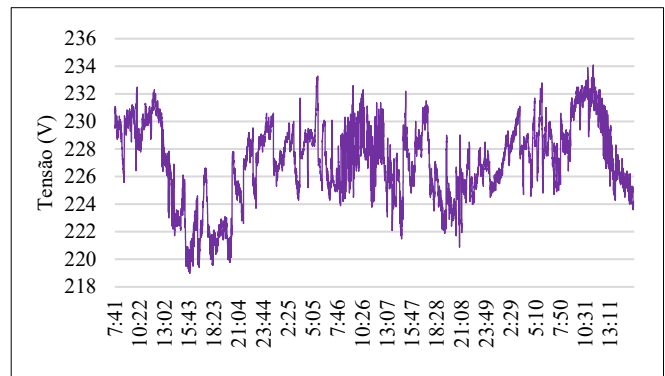


Fig. 13. Tensão em Regime Permanente Fase C.

Os valores de tensão durante esse período de medição atingiram picos de até 234,2 V em algumas amostras, ou seja, se enquadrando, em níveis de tensão críticos de acordo com a Fig. 1. Durante a noite verificou-se uma diminuição nos níveis de tensão atingindo 218,5 V.

As flutuações observadas nas

Fig. 11, Fig. 12 e Fig. 13 ocorreram devido às variações de irradiância ao longo do dia. Os níveis de tensão mais elevados são observados nos períodos de maior irradiância, e os níveis menores são observados no período noturno quando não há geração. A TABELA VIII apresenta um resumo dos resultados encontrados nas três fases.

Os dados apresentados na TABELA VIII variaram dentro da faixa de valores adequados estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST, que estão indicados na Fig. 1.

TABELA VIII  
VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS, P95% E MÉDIOS DA TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

	FASE A (V)	FASE B (V)	FASE C (V)
<b>Máximo</b>	234,20	234,00	234,10
<b>Mínimo</b>	220,30	218,50	219,00
<b>P95%</b>	232,00	231,20	231,40
<b>Média</b>	227,90	227,36	227,08

#### F. Desequilíbrio de Tensão (FD)

Analisando as

Fig. 11, Fig. 12 e Fig. 13 foi possível observar desequilíbrio de tensão entre as fases do sistema elétrico. Considerando esta ocorrência, o fator de desequilíbrio de tensão monitorado foi coletado durante um período de três dias e está ilustrado na Fig. 14.

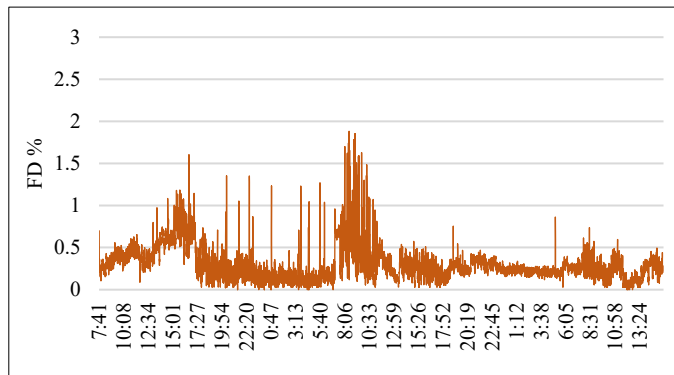


Fig. 14. Desequilíbrio de Tensão.

O Módulo 8 do PRODIST permite valores de FD de no máximo 3%, e os dados observados no período foram abaixo do recomendado. O valor máximo atingido foi de 1,88%, mas a média foi de 0,31% durante os dias de monitoramento, como pode ser observado na Fig. 14.

#### G. Variação de Frequência

Na Fig. 15 são apresentados os dados de frequência monitorados durante um período de 3 dias. Os valores de frequência variaram entre 59,8 e 60,1 Hz.

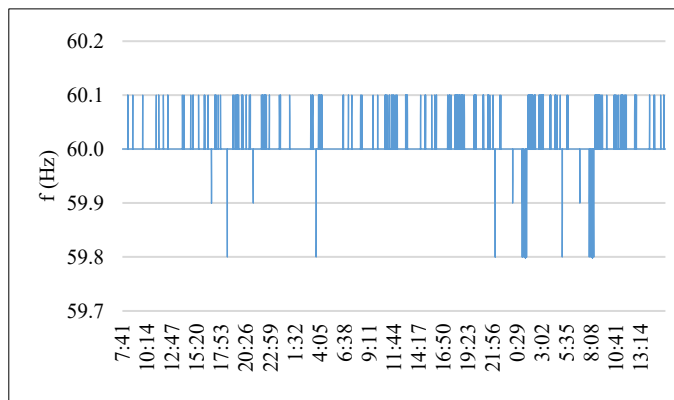


Fig. 15. Variação de Frequência ao longo do dia.

Os dados obtidos mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 da PRODIST durante todo o período observado. A média dos dados de frequência foi de aproximadamente 60 Hz durante os dias de medições.

#### V. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo observar os efeitos da inserção de um sistema fotovoltaico na rede elétrica. Para isso foram realizadas medições na saída do inversor do SFCR instalado no Laboratório de Energia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Posteriormente, verificou-se que os resultados obtidos atendiam aos critérios estabelecidos em normas pelo PRODIST Módulo 8 relativos à QEE.

Para o nível de  $DTT_v$ , foram observadas pequenas deformações na forma de onda. No entanto, os valores observados não são preocupantes, tendo atingido um valor máximo de 4,56%, estando assim, longe dos valores limites estabelecidos pelo PRODIST. Os valores de  $DTT_p$ ,  $DTT_i$  e  $DTT_3$  também permaneceram dentro dos limites desejados.

Os valores de FP variaram bastante durante o dia, atingindo níveis desejados quando a potência injetada se aproximava da potência nominal do inversor. Por isso, os baixos níveis de FP podem ser amenizados aumentando o número de módulos fotovoltaicos, visto que o inversor utilizado está sobredimensionado, ou seja, o sistema operando com FP capacitivo, permitindo injeção de potência reativa na rede.

Ao analisar o desempenho da tensão em regime permanente verificou-se que durante o funcionamento do SFCR houve um aumento do nível de tensão da rede, chegando a atingir 234,2 V em alguns momentos, valores estes considerados críticos, segundo os limites estabelecidos pelo PRODIST. Estes níveis de tensão podem se tornar um problema, vindo a causar perturbações na rede e danificar aparelhos elétricos.

Por fim, para os valores de desequilíbrio de tensão (FD), verificou-se máximos de 1,88% e assim como a variação de frequência, se manteve durante todo o processo dentro dos limites estabelecidos.

No final desse trabalho, conclui-se que os impactos após a inserção do pequeno SFCR, quando comparado com a carga instalada do Laboratório, podem ser considerados pequenos. Destacando-se as elevações de tensões observadas em momentos pontuais, fator de potência baixo e inserção de potência reativa na rede.

O desempenho do SFCR com relação aos critérios de qualidade de energia mostrou-se satisfatório, embora ainda haja a possibilidade de melhoria na questão do fator de potência da instalação. Como o uso dessa tecnologia cresce bastante no Brasil, ampliar esse tipo de estudo é de grande importância para que o país ingresse com sucesso no uso dessa fonte de energia.

Ainda que o presente trabalho permita uma boa avaliação dos indicadores de QEE no SFCR é sugerido para trabalhos futuros um estudo, durante um maior período, a fim de verificar a variação desses indicadores a partir das mudanças de níveis de irradiância e diferentes condições climáticas ao longo de todo o ano.

#### REFERÊNCIAS

- [1] EPE, "Banco de Informações de Geração," 2019. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>.
- [2] T. de O. A. Rocha, "Contribuições para estratégia de controle aplicada à geração fotovoltaica interconectada à rede elétrica," 2015.
- [3] R. H. Lasseter and Lasseter, "Microgrids and Distributed Generation," *J.*

- Energy Eng.*, vol. 133, no. 3, pp. 144–149, 2007.
- [4] M. M. Casaro and D. C. Martins, “Processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica,” *Sba Control. Automação Soc. Bras. Autom.*, vol. 21, no. 2, pp. 159–172, 2010.
- [5] F. Caixeiro Mattos, V. Sobreira Lacerda, R. Lacerda Valle, A. A. Ferreira, P. Gomes Barbosa, and H. A. Carvalho Braga, “Contribution To The Study Of A Single-Phase And Single Stage Photovoltaic System,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 5, pp. 1265–1271, 2015.
- [6] S. M. Rivera Sanhueza and S. C. Leal Freitas, “Overvoltage Forecast in a Urban Distribution Power Grid Considering PV Systems Conection,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 8, pp. 2221–2227, 2018.
- [7] A. Pinto, R. Zilles, and I. Bet, “Excedente de reativos em sistemas fotovoltaicos conectados à rede,” in *IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES*, 2012, pp. 1–7.
- [8] M. Z. Fortes, V. H. Ferreira, I. S. MacHado, and W. C. Fernandes, “Harmonic analysis of distributed generation in Smart City Búzios project,” *2015 IEEE Work. Power Electron. Power Qual. Appl. PEPQA 2015 - Proc.*, 2015.
- [9] J. B. de M. Filho and J. G. de Azevedo, “Qualidade da Energia na Geração Fotovoltaica Através de Inversores de Diferentes Tipos e Fabricantes,” in *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2018.
- [10] M. Cunha Clark Leite, F. Alisson Martins Vieira, V. Bravo Silva, M. Zamboti Fortes, and D. Henrique Nogueira Dias, “Harmonic Analysis of a Photovoltaic Systems Connected to Low Voltage Grid,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 1, pp. 112–117, 2018.
- [11] L. M. Beliski, L. T. Scarabelot, and G. A. Rampinelli, “Aálise da Qualidade de Energia Elétrica de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída em Unidades Prossumidoras Residenciais,” in *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2018.
- [12] G. D. D. Molin, “Análise da qualidade da energia elétrica de um sistema fotovoltaico conectado à rede,” pp. 1–75, 2014.
- [13] ANEEL, *Agência nacional de energia elétrica resolução normativa n*, no. D. 2001, p. 11.
- [14] F. R. Garcia, “Harmônicos Em Sistemas Elétricos De Potência,” 2010.
- [15] E. A. de F. Nunes, “Análise de impactos na rede de distribuição de energia elétrica decorrentes da inserção de sistemas de geração fotovoltaicos,” 2017.
- [16] É. D. F. Morais and R. G. Vieira, “Inspeção das Instalações Elétricas do Prédio de Engenharias I da UFERSA – Campus Mossoró - e Adequação às Normas Vigentes: NR10, NBR 5410:2004, NBR 5419/2015 e NBR ISO/CIE 8995-1,” Mossoró, 2016.
- [17] ABB, “ABB inverter station.” pp. 6–9.
- [18] Instrutemp, “ITAE-3600 Manual de Instruções.” .



**Maria Izabel da Silva Guerra** Graduada em Engenharia de Energia pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (2013), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Potiguar (2014) e Mestre em Energias Renováveis pela Universidade Federal da Paraíba (2017). Atualmente é professora da UFERSA

Tem experiência na área de Energias Alternativas Renováveis, com ênfase em Energia Solar Térmica e no aprimoramento da tecnologia de conversão fotovoltaica. Também tem experiência em Eficiência Energética, atuando principalmente nos seguintes temas: diagnóstico energético, adequação a NR-10 e instalações elétricas.



**Silvo de Lima Bandeira** é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte em 2018. Atualmente é engenheiro eletricista, atuando no mercado de trabalho na sua área de formação, especialmente com projetos de instalações elétricas.



**Romênia Gurgel Vieira** é graduada em Engenharia de Energia pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte (2012). Obteve o título de mestre em Sistemas Comunicação e Automação pela UFERSA. Atualmente é professora da UFERSA. Tem experiência na área de energias renováveis,

com ênfase e, Energia Solar Fotovoltaica, e suas pesquisas se concentram nesta área. Também tem experiência em Eficiência Energética e Instalações Elétricas, atuando principalmente nos seguintes temas: diagnóstico energético, adequação a NR-10.