

Avaliação da Distorção Harmônica de Tensão e de Corrente em uma Instalação com Geração Fotovoltaica

Mariana Costa Falcão, Luiz Otávio Manhani
Machado, Dionízio Paschoareli Júnior
FEIS - UNESP Ilha Solteira
marianacostafalcao@gmail.com

Michele Akemi Haro, Alexandre Augusto da Silva,
José Francisco Resende da Silva
Elektro-Eletricidade e Serviços S.A.

Resumo — As fontes utilizadas na geração distribuída, em particular os sistemas fotovoltaicos, são soluções para problemas do sistema elétrico como, por exemplo, a crescente demanda energética. Entretanto, a utilização dos sistemas fotovoltaicos pode gerar problemas na qualidade da energia elétrica. Desta forma, deve-se avaliar o impacto que a conexão desse sistema pode causar nos parâmetros de qualidade de energia. Este trabalho apresenta, através de resultados experimentais, uma análise do impacto de um sistema fotovoltaico nas distorções harmônicas de tensão e corrente. Quando aplicáveis, os resultados são comparados aos limites do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST).

Palavras-chaves — Qualidade de Energia Elétrica, Sistemas Fotovoltaicos e Geração Distribuída.

I. INTRODUÇÃO

As redes de energia elétrica passaram por diversas modificações ao longo dos anos. Dentre as mudanças pode-se citar a introdução da geração distribuída (GD). O sistema elétrico brasileiro era formado basicamente por grandes centrais geradoras distantes dos grandes centros consumidores, necessitando de investimentos constantes no transporte eficiente da energia elétrica. Com a GD tem-se uma nova opção para diversificar a matriz energética, dar mais flexibilidade ao sistema e, principalmente, oferecer uma solução para a crescente demanda energética [1].

Das fontes geradoras aplicadas em GD, os sistemas fotovoltaicos (SF) são normalmente utilizados em instalações residenciais e comerciais. Com a produção em larga escala e a evolução dos equipamentos de eletrônica de potência, os SF tornaram-se mais acessíveis em relação às questões de investimentos e instalação. Outro fator interessante dos SF é que se trata de uma fonte de geração renovável de energia, apesar de intermitente [1].

Os SF conectados à rede são constituídos por painéis fotovoltaicos (PV), inversores e medidores eletrônicos bidirecionais. Esses sistemas, diferente dos isolados, dispensam o uso de bancos de baterias, pois a energia excedente é enviada diretamente para a rede elétrica, justificando a presença do medidor bidirecional, o qual registra quanta energia é consumida e quanta é fornecida.

Em uma rede com SF conectados, pode ocorrer uma elevação no conteúdo harmônico, principalmente da corrente, devido à

presença de cargas não lineares [2]. O impacto que o SF pode provocar na qualidade da energia elétrica (QEE) varia de acordo com as condições do local aonde for utilizado, como por exemplo o tipo e a quantidade da carga conectada.

Desta forma, como foi apresentado na conclusão de [3], tem-se a importância de avaliar a QEE antes e depois da conexão do SF, para identificar se sua operação causa impactos consideráveis nos parâmetros, dentre eles as distorções harmônicas. Essas análises são necessárias para melhor compreensão do funcionamento do SF quando conectados à rede, principalmente os dados utilizados são experimentais. Este trabalho tem como objetivo identificar eventuais elevados conteúdos harmônicos tanto de tensão como de corrente através da análise de resultados experimentais de medições de QEE em uma instalação com SF.

II. AVALIAÇÃO DA QEE NO CONTEXTO DE SF

A conexão de SF, pode ocasionar alterações nos parâmetros de QEE, por exemplo: alteração no perfil de tensão, flutuações de tensão, injeção de harmônicos de corrente, desequilíbrios entre fases e harmônico de tensão [3]. Dentre as alterações apresentadas, os harmônicos de corrente e tensão são de interesse específico deste trabalho.

Com os avanços tecnológicos, os equipamentos tornaram-se cada vez mais sensíveis a perturbações na rede a que estão conectados, ao passo que provocam mais distúrbios por suas características não lineares. Com isso, tornou-se essencial avaliar, controlar e melhorar a qualidade da energia elétrica. Tanto a corrente quanto a tensão são objetos de estudo para se compreender os problemas que podem ser encontrados nos sistemas de energia elétrica. Dentre os parâmetros de QEE, tem-se os harmônicos de tensão e corrente [4].

Os harmônicos são um dos problemas de QEE mais estudados. A forma de onda da tensão nunca é exatamente senoidal de frequência constante. As distorções harmônicas existem devido às características não lineares de equipamentos e cargas conectadas ao sistema de fornecimento de energia e que são, normalmente, fontes de corrente que injetam harmônicas de corrente no circuito e acabam por resultar em distorções de tensão [4].

No que se diz respeito às normas nacionais de QEE, tem-se o módulo 8 do PRODIST. Ele define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às

perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) fixar padrões para os indicadores de QEE [5].

Recentemente, uma nova revisão alterou a forma de como se avaliar alguns parâmetros da qualidade do produto. Essas modificações podem ser vistas como um avanço significativo no que diz respeito a busca de uma melhor qualidade de energia elétrica. Pode-se citar como alteração interessante os limites para as distorções harmônicas totais (DHT). Na revisão anterior tinha-se um valor limite para essas distorções totais e uma tabela com limites para as distorções individuais. Nesta nova revisão foram retirados os limites para individuais e inseridos limites para DHT para componentes pares e ímpares não múltiplas de 3, assim como para componentes múltiplas de 3 [5].

Apesar das mudanças, o PRODIST não considera parâmetros para avaliação do conteúdo harmônico na corrente. Isso ocorre, principalmente, pela dificuldade em localizar a fonte geradora do distúrbio para que o problema seja mitigado. Entretanto, harmônicos de corrente podem ser muito prejudiciais à rede e aos equipamentos dos consumidores [4]. Sendo assim, esse trabalho apresenta alguns resultados desse parâmetro de QEE, mesmo que não seja observado pelo módulo 8.

Dentre os parâmetros que o módulo 8 abrange para a qualidade do produto, os que serão considerados para este artigo serão: a DHT e o espectro harmônico da tensão, que será utilizado para calcular as distorções pares, ímpares e múltiplas de 3. Também são consideradas para análise as distorções harmônicas da corrente.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados das medições de QEE que foram realizadas em uma escola com um SF. Serão apresentados resultados tanto do padrão de entrada (PE), como do secundário do transformador (ST) no qual a instalação está conectada. O transformador em questão apresenta as seguintes características:

- Potência: 112,5 kVA;
- Tensões Nominais: 13,8 kV (primário) – 220 V (secundário);
- Ligação Primário: Delta;
- Ligação Secundário: Estrela Aterrado.

A. Metodologia

Para realizar as medições de QEE foi utilizado o medidor FLUKE 1760. O medidor utiliza o software PQ Analyse tanto para receber os parâmetros para as medições, quanto para acessar as medições realizadas. Através do PQ Analyse é possível configurar os parâmetros de medição do medidor e fazer as leituras das medições.

O medidor registra, de forma contínua, valores RMS, assim como os valores mínimos e máximos correspondentes para tensão, corrente, potências (ativa, reativa e aparente), kWh, oscilação, desequilíbrios, frequência, harmônicos e inter harmônicos. A conexão entre o medidor e o computador é realizada através de um cabo Ethernet.

A seguir tem-se os resultados da análise comparativa das medições de QEE que foram realizadas antes e depois da instalação do SF. Para realizar a análise foram utilizados os limites determinados pelo módulo 8 do PRODIST, quando

aplicáveis. Cada figura apresenta os valores medidos em um dia completo de medição, integralizados a cada 10 minutos. No eixo x das figuras que apresentam a DHT, tem-se a informação no formato Dia.Hora, sendo que as horas são apresentadas de 0 a 24h. As curvas e barras de cores azul, vermelho e verde apresentadas nos resultados correspondem às três fases da instalação.

Em relação ao SF utilizado, tem-se as seguintes informações técnicas:

- Potência total Instalada: 22,29 kWp;
- Geração Mensal de Energia Estimada: 2365kWh;
- Número de PV: 96, sendo 6x16 módulos de 230W;
- Número de inversores: 3 Inversores SMA, Modelo SMC 7000HV;
- Fator de Potência: 0,85 – 1.

Os valores das componentes harmônicas dos espectros são somados para se obter as DHT da tensão para componentes pares (DTT_p) e ímpares (DTT_i) não múltiplas de 3 (DTT₃), assim como para componentes múltiplas de 3, desta forma torna-se possível avaliar os resultados de acordo com os limites do módulo 8 [5].

B. Resultados

Na sequência são apresentados os resultados para: DHT da tensão e o seu respectivo espectro harmônico e DHT da corrente e seu respectivo espectro harmônico, para os dois locais de medição (PE e ST).

1) *DHT da Tensão no PE*: Para analisar a DHT, tem-se em [5] que seu valor deve igual ou inferior a 10%. Na Fig.1 e na Fig. 2 tem-se as distorções harmônicas da tensão antes e depois da conexão do SF.

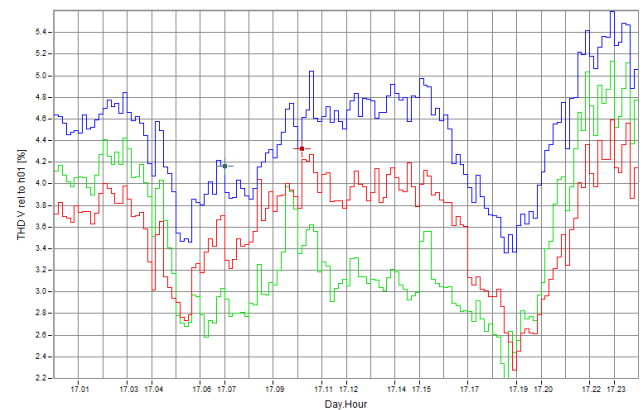


Fig. 1. DHT da Tensão no PE antes da conexão do SF.

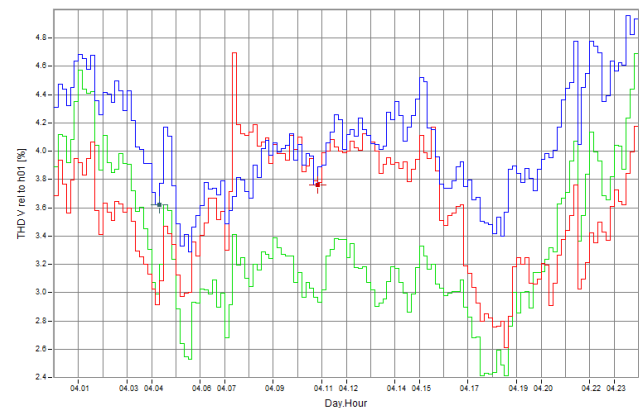


Fig. 2. DHT da Tensão no PE depois da conexão do SF.

Nas Fig. 1 e 2 o valor da DHT da tensão não ultrapassa os limites de 6 e 5%, respectivamente. Sendo assim, antes e depois da instalação do SF o limite de DHT da tensão proposto em [5] de 10% é respeitado.

2) *Espectro Harmônico da Tensão no PE:* Nas Fig. 3 e 4 observam-se os espectros antes e depois do SF. Os valores das componentes são somados para se obter as DHT para componentes pares e ímpares não múltiplas de 3, assim como para componentes múltiplas de 3. Desta forma, tem-se que antes do SF: $DTT_p = 0,58\%$, $DTT_i = 6,06\%$ e $DTT_3 = 2,76\%$. Depois do SF, tem-se: $DTT_p = 0,51\%$, $DTT_i = 5,57\%$ e $DTT_3 = 2,59\%$.

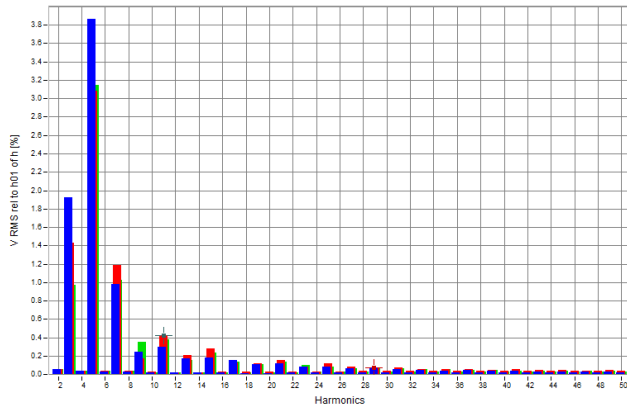


Fig. 3. Espectro Harmônico da Tensão no PE antes da conexão do SF.

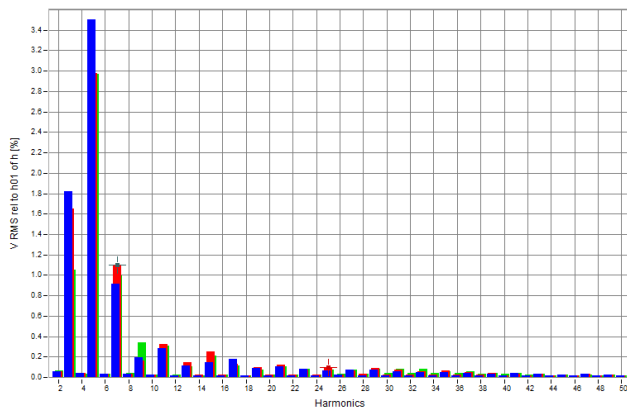


Fig. 4. Espectro Harmônico da Tensão no PE depois da conexão do SF.

Com os resultados das DHT das componentes pares, ímpares e múltiplas de 3 tem-se que a instalação do SF não causou impactos nesse parâmetro de QEE, mostrando inclusive valores ligeiramente menores do que os encontrados antes do SF.

3) *DHT da Corrente no PE:* Na Fig.5 e na Fig. 6 tem-se as distorções harmônicas da corrente antes e depois da conexão do SF.

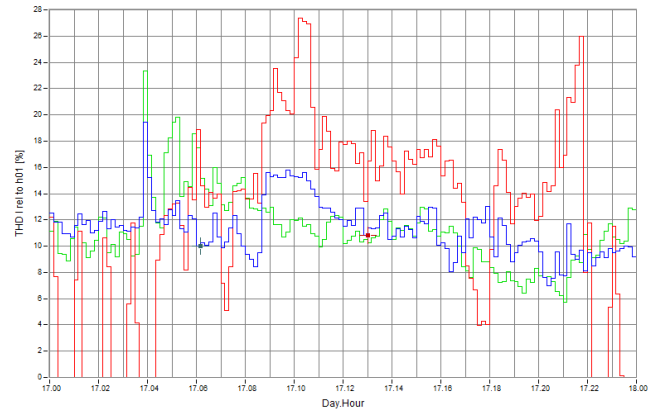


Fig. 5. DHT da Corrente no PE antes do SF.

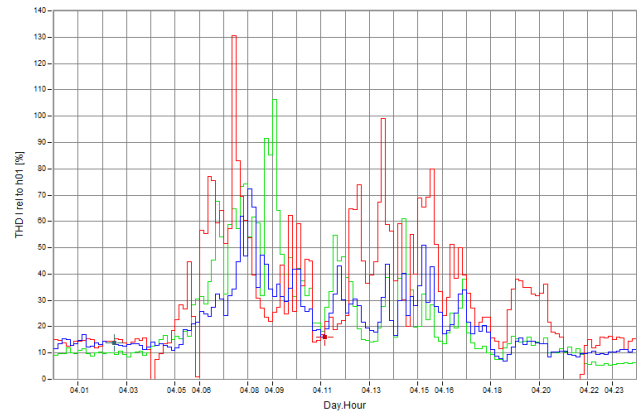


Fig. 6. DHT da Corrente no PE depois da conexão do SF.

A DHT da corrente depois do SF, na Fig. 6, apresenta mudanças significativas em comparação com resultados anteriores apresentados na Fig. 5. O impacto do SF foi considerável, ocasionando picos de até 130% da DHT da corrente entre as 6h da manhã e 17h da tarde, horários em que os SF está em pleno funcionamento.

4) *Espectro Harmônico da Corrente no PE:* Na Fig.7 e na Fig. 8 tem-se o espectro harmônico da corrente antes e depois da conexão do SF.

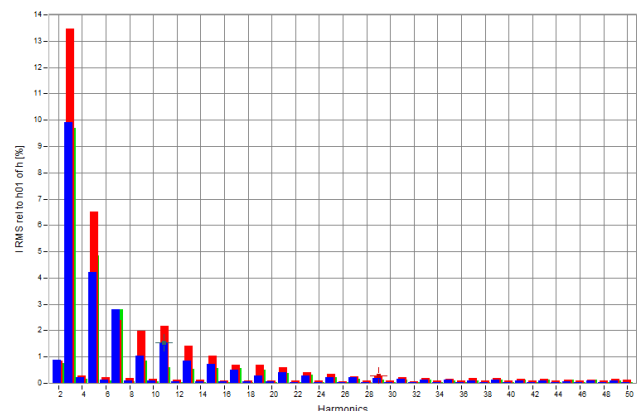


Fig. 7. Espectro Harmônico da Corrente no PE antes da conexão do SF.

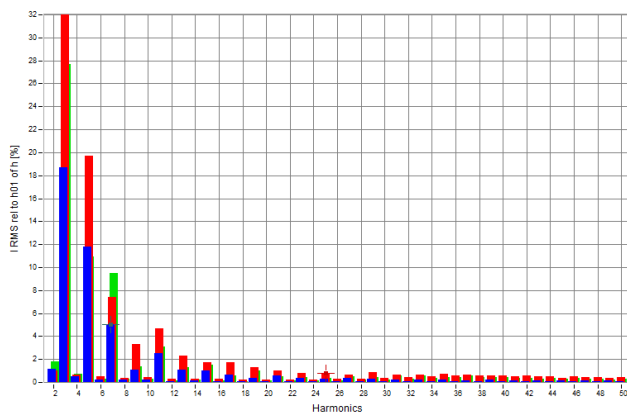


Fig. 8. Espectro Harmônico da Corrente no PE depois da conexão do SF

Assim como os resultados da DHT da corrente anteriores, observa-se um aumento considerável das componentes harmônicas, principalmente a terceira, atingindo quase 32% em relação à fundamental.

5) *DHT da Tensão no ST*: Para analisar a DHT da tensão, tem-se em [5] que seu valor deve igual ou inferior a 10%. Na Fig.9 e na Fig. 10 tem-se as distorções harmônicas da tensão antes e depois da conexão do SF.

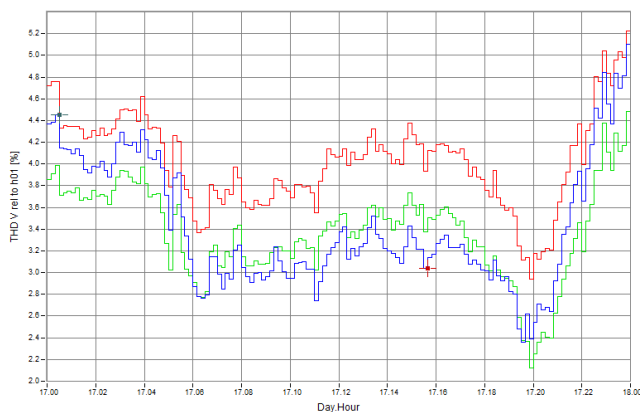


Fig. 9. DHT da Tensão no ST antes da conexão do SF.

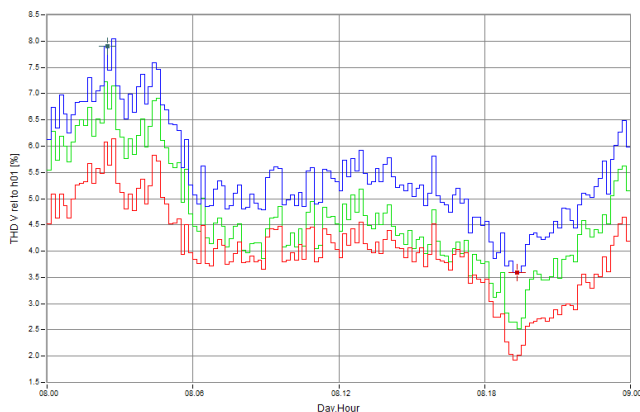


Fig. 10. DHT da Tensão no ST depois da conexão do SF.

Ao analisar os resultados das Fig. 9 e 10 observa-se uma elevação na DHT da tensão. Antes do SF tem-se em média 4,02% de DHT, enquanto depois esse valor passa para 5,46%. Esse impacto na DHT da tensão no ST foi constatado na medição mais recente realizada durante o período letivo da escola, diferente das outras medições que ocorreram no

período de férias e não apresentaram alterações significativas nas medidas.

Na Fig. 11 a seguir observa-se a DHT da tensão no ST com a operação do SF, apresentando os resultados da Fig.10 além dos três dias seguintes, sendo assim tem-se os valores medidos entre os dias 08 e 12 de março de 2017.

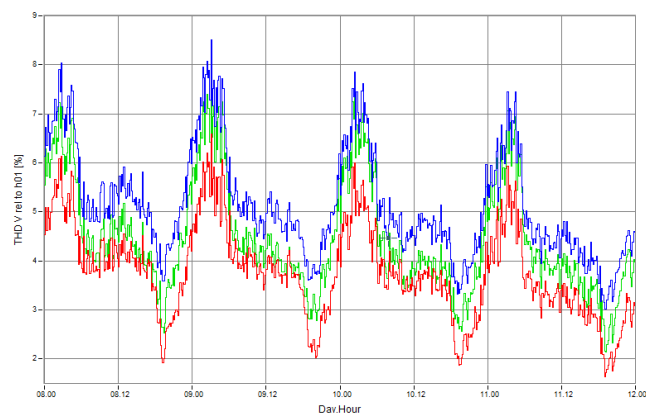


Fig. 11. DHT da Tensão no ST depois da conexão do SF (Quatro dias).

Nota-se que a curva de quatro dias apresentada na Fig. 11 mostra o mesmo comportamento da apresentada na Fig. 10.

6) *Espectro Harmônico da Tensão no ST*: Nas Fig. 12 e 13 observam-se os espectros antes e depois da conexão do SF. Os valores das componentes são somados para se obter as DHT para componentes pares e ímpares não múltiplas de 3, assim como para componentes múltiplas de 3. Desta forma, tem-se que antes do SF: $DTT_p = 0,28\%$, $DTT_i = 5,33\%$ e $DTT_3 = 1,97\%$. Depois do SF, tem-se: $DTT_p = 0,52\%$, $DTT_i = 7,57\%$ e $DTT_3 = 3,01\%$.

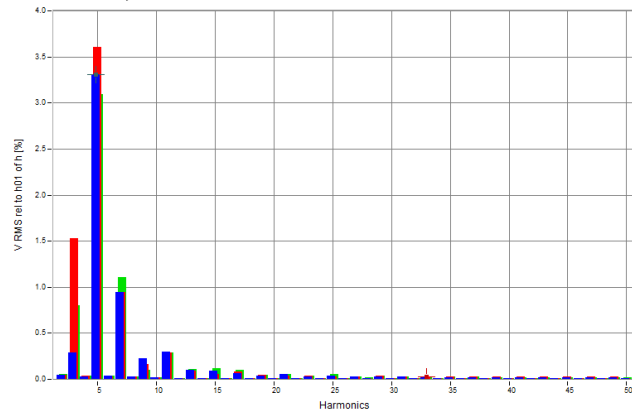


Fig. 12. Espectro Harmônico da Tensão no ST antes da conexão do SF.

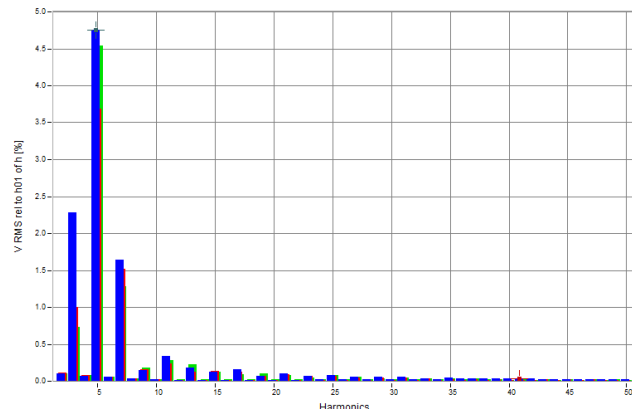


Fig. 13. Espectro Harmônico da Tensão no ST depois da conexão do SF.

Com os resultados das Fig. 12 e 13, observa-se um aumento da quinta harmônica de 3,5% para 4,7%. Consequentemente, o valor de DTT_i aumenta de 5,33% para 7,57%, ultrapassando em 0,07% o limite estabelecido em [5] de 7,5%.

7) *DHT da Corrente no ST*: Na Fig.14 e na Fig. 15 tem-se as distorções harmônicas da corrente antes e depois da conexão do SF.

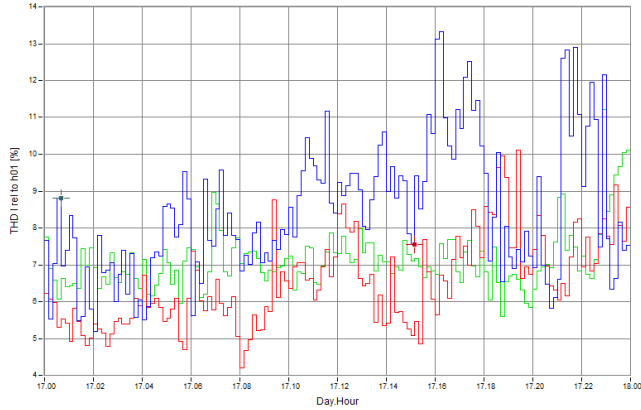


Fig. 14. DHT da Corrente no ST antes da conexão do SF.

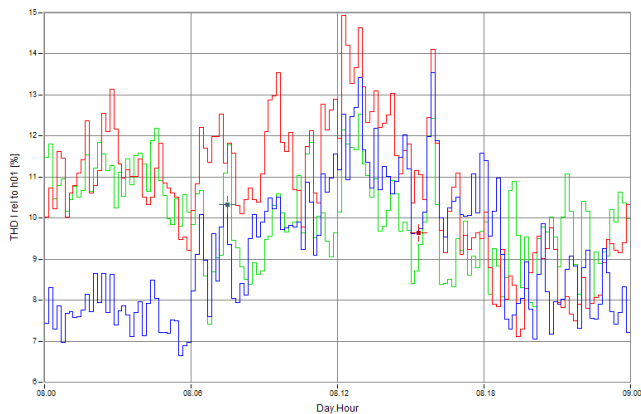


Fig. 15. DHT da Corrente no ST depois da conexão do SF.

Assim como nos resultados para a DHT da tensão no ST, para a corrente também observa-se um aumento nos valores. Em média eles passam de 8,43% antes da conexão do SF para 10,68% depois.

8) *Espectro Harmônico da Corrente no ST*: Na Fig.16 e na Fig. 17 tem-se o espectro harmônico da corrente antes e depois da conexão do SF.

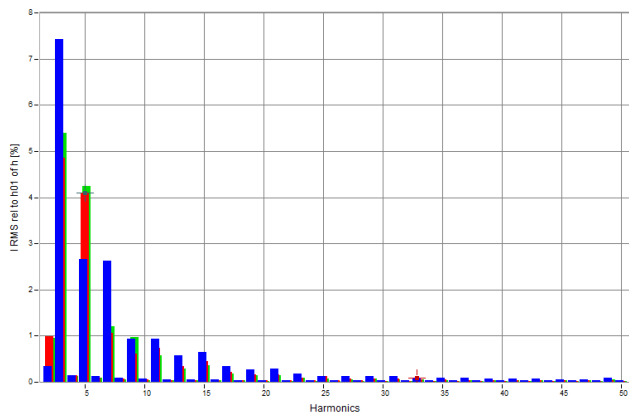


Fig. 16. Espectro Harmônico da Corrente no ST antes da conexão do SF.

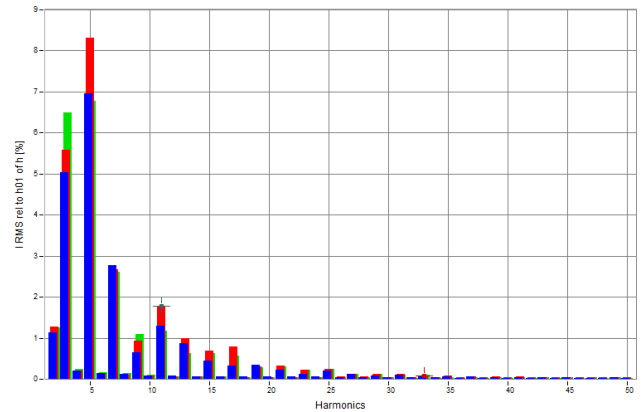


Fig. 17. Espectro Harmônico da Corrente no ST depois da conexão do SF.

Nos resultados das Fig. 16 e 17, assim como os apresentados no espectro harmônico da tensão, observa-se um aumento da quinta harmônica de 4% para 8,2%. Tem-se que o impacto nas componentes harmônicas da corrente foi mais expressivo que os apresentados para a tensão, mais que dobrando a porcentagem da quinta harmônica após a conexão do SF.

C. Discussão

Nas Fig. 1 e 2 observa-se que não ocorreram mudanças consideráveis na DHT da tensão antes e depois da instalação do SF, e os resultados antes e depois atendem a norma [5]. O mesmo acontece nas Fig. 3 e 4 do espectro.

Apesar de não ter sido observado impacto na tensão no PE, tem-se um resultado interessante nos itens seguintes: o aumento considerável do conteúdo harmônico da corrente observado nas Fig. 6 e 8 em comparação com os resultados de antes da instalação do SF nas Fig. 5 e 7. Na Fig.5, tem-se uma DHT média da corrente de 12,20%, já na Fig. 6 esse valor vai para 31% chegando a um pico de 130% em uma das fases. Esse resultado está diretamente ligado à conexão do SF. Nota-se que as elevações apresentadas na Fig. 6 ocorrem entre as 6h da manhã e 17h da tarde, período em que o SF está em operação, sendo os maiores picos nos horários de maior produção.

Na sequência são apresentados os resultados referentes as medições no ST. Como o transformador atende outros clientes além da escola, o conteúdo harmônico tende a ser compensado, apesar disso, observa-se nas Fig. 9 e 10 uma elevação da DHT da tensão em 1,44%, passando dos 5%. Apesar dessa alteração o valor encontrado atende os limites estabelecidos em [5]. Na Fig. 11 tem-se os valores de DHT da tensão para quatro dias de medição, mostrando que a elevação do conteúdo harmônico segue um padrão bem definido de carga.

Já nos resultados das Fig. 12 e 13, observou-se um resultado que ultrapassou em 0,07% o limite estabelecido no módulo 8. Trata-se da DTT_i após a instalação do SF. A norma limita a 7,5% e o resultado foi de 7,57%. O resultado está praticamente dentro da norma, entretanto é um dado que necessita de atenção. Esse valor está ligado principalmente ao aumento da quinta harmônica observado na Fig.13.

Quando se observa um aumento na DHT da tensão é esperado encontrar também na da corrente, o que realmente acontece nos resultados das Fig. 14 e 15. Enquanto para a tensão o aumento foi de 1,44%, na corrente tem-se que a DHT passou de 8,43% para 10,68%, apresentando 2,25% de diferença. Na Fig. 15 é possível observar um comportamento semelhante ao apresentado na Fig. 6, pois a elevação da DHT da corrente segue o perfil da operação do SF, evidenciando seu

impacto. Esse resultado também aparece no espectro harmônico das Fig. 16 e 17, onde a quinta harmônica tem seu valor mais que dobrado.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou resultados experimentais de medições de QEE realizadas em dois pontos: no padrão da entrada da escola com o SF e no secundário do transformador ao qual a mesma está conectada. Foram observadas medições de antes e depois da instalação do SF.

Os resultados referentes à distorção harmônica da tensão no PE não apresentaram mudanças antes e depois da conexão do SF. Entretanto, a escola em questão estava em período de férias, sendo assim, a carga estava no mínimo. Isto pode ter influenciado os resultados aonde se esperava encontrar um impacto.

Já em relação à distorção harmônica da corrente no PE foi possível encontrar resultados esperados, mostrando a elevação do conteúdo harmônico após a conexão do SF. A terceira harmônica, por exemplo, passa de pouco mais de 13% para quase 32%, como é possível observar nas Fig. 7 e 8. Este conteúdo harmônico considerável pode gerar diversos problemas, como mal funcionamento de equipamentos ou até avaria dos mesmos.

Em sequência, deve-se comentar sobre o resultado elevado da quinta harmônica nas medições no ST. No mesmo ponto foram realizadas outras medições e não foram encontrados resultados diferentes daqueles apresentados antes da instalação do SF. Desta forma, acredita-se que esse resultado seja devido a diferença entre as datas das medições. As medições anteriores foram realizadas em períodos de férias escolares, já a última medição foi a mais recente, realizada em março de 2017, quando a escola estava em período letivo. Conclui-se, então, que a quinta harmônica elevada é decorrente das cargas conectadas utilizadas na escola no período letivo, como computadores, por exemplo.

Existem diversas pesquisas com propostas para mitigar o conteúdo harmônico em redes de distribuição com SF, por exemplo em [2]. Entretanto, considera-se interessante a proposta apresentada em [6], onde é proposto utilizar a própria interface do inversor do SF como resistências virtuais harmônicas, melhorando a QEE e diminuindo o conteúdo harmônico.

Foram observadas as distorções harmônicas tanto da tensão quanto da corrente antes e após a instalação do SF. Esses resultados servem de auxílio para compreender como a rede se comporta experimentalmente no contexto de QEE e SF.

V. REFERÊNCIAS

- [1] I. Konstantelos, S. Giannelos and G. Strbac, "Strategic Valuation of Smart Grid Technology Options in Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1293-1303, March 2017.
- [2] J. He, Y. W. Li, F. Blaabjerg and X. Wang, "Active Harmonic Filtering Using Current-Controlled, Grid-Connected DG Units With Closed-Loop Power Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 642-653, Feb. 2014.
- [3] O. S. Nduka and B. C. Pal, "Harmonic Domain Modeling of PV System for the Assessment of Grid Integration Impact," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 1154-1165, July 2017.
- [4] DUGAN, R. C. et al. *Electrical power systems quality*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [5] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, PRODIST Módulo 8 Revisão 8 (01/01/2017). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>, 2012. Acesso em março de 2017.
- [6] S. Munir and Y. W. Li, "Residential Distribution System Harmonic Compensation Using PV Interfacing Inverter," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 816-827, June 2013.