

Análise da propagação de harmônicas de alta frequência em uma rede de distribuição de baixa tensão

Kelly N. C. Silva* José Rubens M. Jr*

* *Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE), Faculdade de Engenharia Elétrica (LADEE), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), (e-mail: {kelly.cunha, jrubens}@ufu.br)*

Abstract: The development of solar photovoltaic generation systems into the grid, electric vehicles and electronic mass-market equipment is characterized by the growth of high frequency emissions in the range of 2–150 kHz. These high-frequency emissions, known as supraharmonics, negatively affect the power quality of electrical distribution systems. It is important to investigate and analyze the propagation of these high frequency currents on the grid for diagnosis and mitigation of any disturbances caused by them. This paper aims to study the propagation of supraharmonic emissions in the real power grid as presented in measurements in a connected photovoltaic inverter and simulations of a typical low voltage distribution grid. The simulations was made by using MATLAB Simulink[®] software to model a distribution grid including supraharmonic current sources allocated in different buses of the system. The results show that the voltage harmonic distortion levels depend on the frequency and impedance along the grid. Further, the results also explore the possibilities of this type of system, showing the consideration of a bank of capacitors (or the intrinsic capacitances of the system) leads almost the total attenuation of supra-harmonic voltages levels.

Resumo: O aumento de sistemas de geração solar fotovoltaica inseridos na rede, veículos elétricos e equipamentos comandados por eletrônica de potência é caracterizado pelo aumento das emissões no intervalo de 2-150 kHz. Essas emissões de alta frequência, conhecidas como supra-harmônicas, afetam negativamente a qualidade da energia dos sistemas de distribuição elétrica. É importante investigar e analisar a propagação dessas correntes de alta frequência na rede para diagnóstico e mitigação de quaisquer distúrbios por elas causados. O objetivo deste trabalho é estudar a propagação das emissões supra-harmônicas na rede elétrica real, apresentadas em medições em um inversor fotovoltaico conectado e em simulações de uma típica rede de distribuição de baixa tensão. Para as simulações, o software MATLAB Simulink[®] foi utilizado para modelar uma rede de distribuição incluindo fontes de corrente supra-harmônicas alocadas em diferentes barramentos. Os resultados mostram que os níveis de distorção harmônica da tensão dependem da frequência e da impedância ao longo do sistema. Ademais, os resultados exploram os cenários potenciais deste tipo de rede elétrica, mostrando que a consideração de um banco de capacitores (ou ainda das capacitâncias intrínsecas das redes elétricas) leva à atenuação praticamente total dos níveis de tensão supra-harmônicas.

Keywords: supraharmonics; harmonic propagation; electric power distribution; power quality.

Palavras-chaves: supra-harmônicas; propagação de harmônicas; sistemas de distribuição; qualidade da energia elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a rede elétrica de distribuição tem passado por significativas mudanças principalmente com a expansão da geração distribuída e a inserção de veículos elétricos. Consequentemente, novos desafios relacionados a qualidade da energia surgiram como as distorções harmônicas de alta frequência, também conhecidas como supra-harmônicas.

O termo supra-harmônicas se refere as emissões de tensão e corrente na faixa de frequência de 2 a 150 kHz (Emanuel and McEachern, 2013). A principal fonte responsável pela

emissão intencional de tensões nessa faixa de frequência são os transmissores PLC (Power-line communication) que fazem parte da infraestrutura de medição inteligente com o transporte de dados em alta frequência. Já os equipamentos com fontes chaveadas comutando em altas frequências são responsáveis por emissões involuntárias, denominadas de emissões não intencionais. Como exemplo desses equipamentos, pode-se citar os sistemas de geração solar fotovoltaica (PV), carregadores para veículos elétricos (EV), corretores de fator de potência ativo (PFC), lâmpadas LED, equipamentos com fontes de alimentação comutadas, como televisores e computadores, aparelhos baseados em inversores, como aparelhos de ar condicionado e geladeiras.

A crescente utilização dessas cargas alimentadas e comandadas por eletrônica de potência tem o potencial de gerar efeitos adversos nos equipamentos dos consumidores e na rede. Dentre os principais efeitos estão erros em medidores inteligentes (Jiang et al., 2015), indesejado desarme de dispositivos de corrente residual (Slangen et al., 2020), estresse térmico adicional e redução da vida útil de lâmpadas (Meyer et al., 2013), interferência na comunicação do PLC, geração de ruído audível e mau funcionamento de equipamentos conectados à proximidade da fonte perturbadora (Klatt et al., 2013) (Meyer et al., 2013) (Meyer et al., 2018).

Ademais, em elevadas frequências o valor da resistência elétrica aumenta como resultado da redução da seção condutora devido ao efeito pelicular. Como consequência existe o aquecimento adicional dos cabos e um aumento de perdas técnicas. O aumento de correntes capacitivas também pode prejudicar o fornecimento de energia, sobreaquecer transformadores e banco de capacitores, danificando sistemas e equipamentos de concessionárias de energia (Alfalahi et al., 2021).

No que se refere à propagação de harmônicas de alta frequência em direção à rede, alguns estudos mostram que essas permanecem principalmente dentro da instalação e não se propagam para dentro da rede (Mueller et al., 2017) (Waniek et al., 2017). Contudo, o conhecimento sobre o assunto ainda é limitado. O comportamento das supra-harmônicas na rede é de difícil previsão pelo fato delas não estarem diretamente ligadas à frequência fundamental (Slangen et al., 2020). Vários fatores influenciam na quantidade de corrente absorvida, tais como o número de dispositivos conectados, a relação entre as impedâncias do dispositivo e a impedância da rede (Espín-Delgado et al., 2020).

O conhecimento sobre a propagação das distorções harmônicas de alta frequência na rede é de suma importância para quantificar seus problemas e evitar eventual subestimação ou superestimação do problema. Ao longo dos últimos anos o número de estudos visando compreender melhor e quantificar as consequências das supra-harmônicas na rede aumentou. Apesar disso, é necessário ter um estudo do comportamento analisando as características reais da rede de distribuição local. Diante do exposto, esse artigo visa contribuir com o tema da propagação de supra-harmônicos na rede com testes laboratoriais e simulações.

Os testes em laboratório analisaram a propagação das tensões supra-harmônicas de um inversor PV em dois pontos distintos: no seu ponto de acoplamento e no painel da instalação. As simulações foram realizadas utilizando o software MATLAB Simulink® para modelar uma rede elétrica de distribuição suscetível as injeções de correntes harmônicas de frequências elevadas. O enfoque é analisar como as injeções supra-harmônicas de correntes se refletem na tensão e como elas se propagam em diferentes pontos do sistema.

2. MEDIÇÕES DE SUPRA-HARMÔNICAS EM UM INVERSOR FOTOVOLTAICO

A estrutura utilizada para os testes do inversor conta com dois emuladores de painéis fotovoltaicos, fabricados

pela ITECH, modelo IT6006C-800-25 (6000 W / 800 V / 25 A), ligados em paralelo, operando em modo mestre / escravo, podendo chegar a uma capacidade total de 12000 W. A interface visual de parametrização dos emuladores fotovoltaicos foram feitas por meio do software SAS1000. As especificações emuladas para os painéis fotovoltaicos foram as condições de teste padrão (STC, irradiância a 1000 W/m² e temperatura da célula a 25°C).

A Figura 1 ilustra a configuração testada.

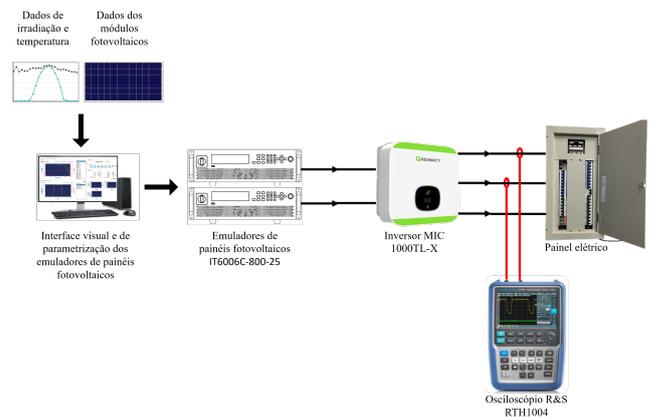


Figura 1. Estrutura laboratorial utilizada nos testes.

Os testes foram feitos em um inversor monofásico da Growatt modelo MIC 1000TL-X operando na sua potência nominal. A Tabela 1 apresenta as especificações do inversor utilizado. O fator de potência do mesmo foi ajustado para o valor unitário.

Tabela 1. Especificações do inversor Growatt MIC 1000TL-X .

Dados de entrada	
Máxima potência CC (STC)	1400W
Máxima tensão CC	500V
Máxima corrente de entrada	13A
Dados de saída	
Potência nominal CA	1000W
Tensão nominal de saída	230V(180Vac-280Vac)
Máxima corrente de saída	4,8A
Frequência da rede CA	50Hz/60Hz, ±5Hz
Fator de potência ajustável	0.8i-0.8c

As medições foram realizadas no ponto de conexão do inversor e no quadro de distribuição do laboratório. A aquisição dos dados referentes as emissões supra-harmônicas foram obtidas com emprego de um osciloscópio portátil RS, modelo RTH1004, com uma taxa de amostragem de 1,25G amostras por segundo.

A Figura 2 apresenta a forma de onda da tensão, juntamente com seu espectro no ponto de conexão do inversor. Duas situações distintas são representadas, a primeira com o inversor desconectado e a segunda com ele conectado e operando no seu ponto de máxima potência. Após a conexão do inversor, é possível observar um pico de 8,5 mV entre 30 kHz e 40 kHz caracterizando sua frequência de chaveamento.

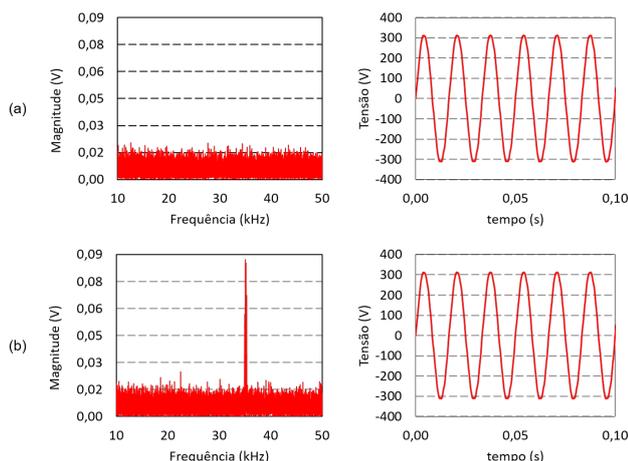


Figura 2. Espectro e forma de onda da tensão no ponto de acoplamento do inversor: (a) com o inversor desconectado; (b) com o inversor conectado.

A Figura 3 mostra o resultado para a forma de onda de corrente e seu espectro no ponto de acoplamento do inversor. Observa-se o mesmo pico entre 30 kHz e 40 kHz, mas com uma magnitude de 43 mA.

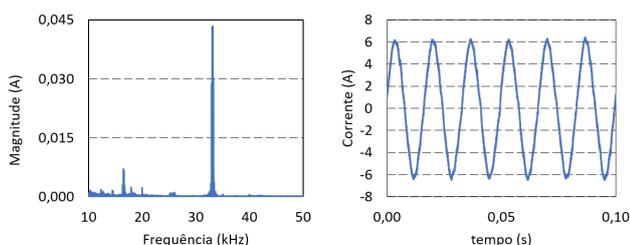


Figura 3. Espectro e forma de onda da corrente no ponto de acoplamento do inversor.

A Figura 4 apresenta os resultados do espectro de tensão e sua forma de onda medidos no quadro de distribuição, a cerca de dez metros de distância do ponto de acoplamento do inversor antes e depois da conexão do inversor. Observa-se uma semelhança entre os dois espectros obtidos e que a frequência de chaveamento do inversor é imperceptível.

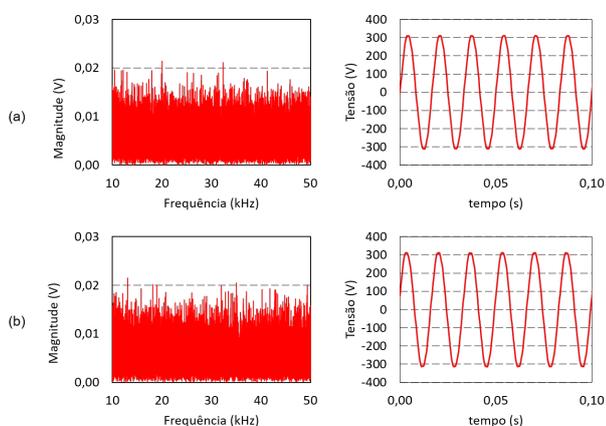


Figura 4. Espectro e forma de onda da tensão no quadro de distribuição: (a) com o inversor desconectado; (b) com o inversor conectado.

A Figura 5 apresenta o espectro e a forma de onda de corrente medidos no quadro distribuição. É possível observar que o pico de corrente na tensão de chaveamento do inversor continua visível, mas com um valor três vezes menor. Já com a desconexão do inversor esse pico não aparece mais. A atenuação que foi percebida, tanto para a tensão quanto para a corrente, a poucos metros de distância da origem da fonte supra-harmônica acontece devido à absorção das capacitâncias dos condutores. Vale ressaltar que os picos em outras faixas de frequência correspondem ao ar condicionado e ao emulador que também estavam ligados no momento dos testes.

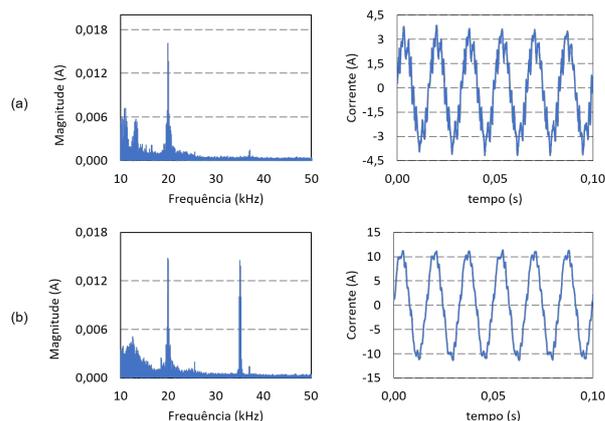


Figura 5. Espectro e forma de onda da corrente no quadro de distribuição: (a) com o inversor desconectado; (b) com o inversor conectado.

3. SIMULAÇÃO DE SUPRA-HARMÔNICAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A rede foi modelada com uma fonte geradora de 13,8 kV conectada a um transformador abaixador (13,8 kV/220 V) de 45 kVA seguido por doze barras, distanciadas de 30 metros umas das outras, alimentando cargas que representam as cargas residenciais. A Figura 6 ilustra esse sistema.

Os parâmetros da linha foram especificados considerando uma rede de distribuição secundária à cabos nus, logo os efeitos capacitivos foram desconsiderados. Os valores das resistências e indutâncias são detalhados na Tabela 2 e foram baseados nos tipos de cabo tipicamente empregados nesse tipo de rede.

Tabela 2. Parâmetros da linha de distribuição para os diferentes tipos de cabo.

Tipo de cabo	4CA	1/0 CA	2/0 CA	4/0 CA
R1 (Ω/km)	1,5285	0,6045	0,4791	0,3020
L1 (mH/km)	0,9557	0,8618	0,8369	0,7913

As frequências escolhidas para a simulação de cargas geradoras de supra-harmônicas são típicas de inversores PV e carregadores EV. Segundo Rönnberg and Bollen (2016), a frequência de comutação de inversores PV comercialmente disponíveis varia de 4 kHz a 20 kHz e seus múltiplos. Para os carregadores EV, as frequências variam de 15 kHz a 100 kHz. O valor da fonte de corrente supra-harmônica

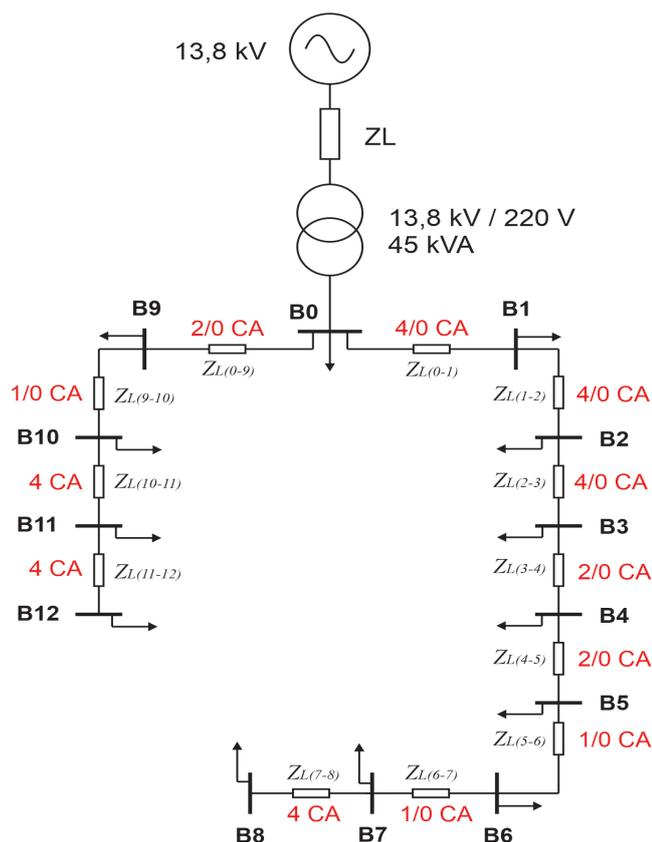


Figura 6. Diagrama do sistema de distribuição utilizado para o estudo de propagação das supra-harmônicas.

considerado foi de 50 mA injetado em cada uma das três fases do sistema. Foram considerados cinco casos de simulação de acordo com a localização da fonte de corrente supra-harmônica, conforme a Tabela 3.

Para cada caso, oito frequências diferentes foram analisadas em duas condições distintas: sem e com um banco de capacitores conectado a barra B1, visto que essa é uma prática comum das concessionárias visando a compensação de reativo.

Tabela 3. Casos simulados.

Caso	Localização da fonte supra-harmônica
A	Barra B12
B	Barra B8
C	Barra B12 e Barra B8
D	Barra B2
E	Barra do transformador

4. ANÁLISES E RESULTADOS

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam os resultados para os casos A e B, respectivamente. Os gráficos são dados em porcentagem da tensão fundamental pela distância ao longo da rede. O ponto inicial representa barra onde foi alocada a fonte de corrente supra-harmônica e a cada 30 metros de distância indica a porcentagem de tensão harmônica nas barras vizinhas.

Observa-se, em ambos os casos, que quanto maior a frequência maior a tensão supra-harmônica. Isso acontece devido ao aumento da impedância da linha que possui

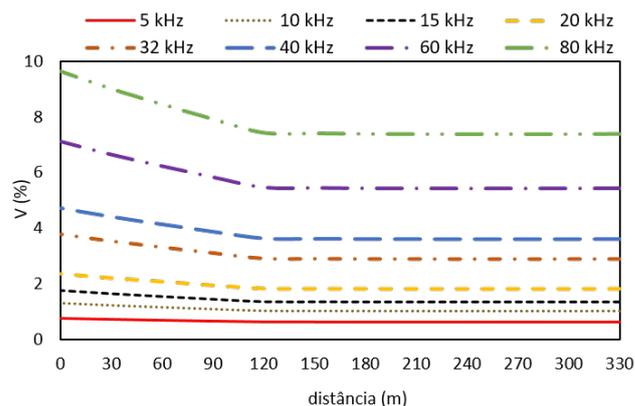


Figura 7. Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para o caso A

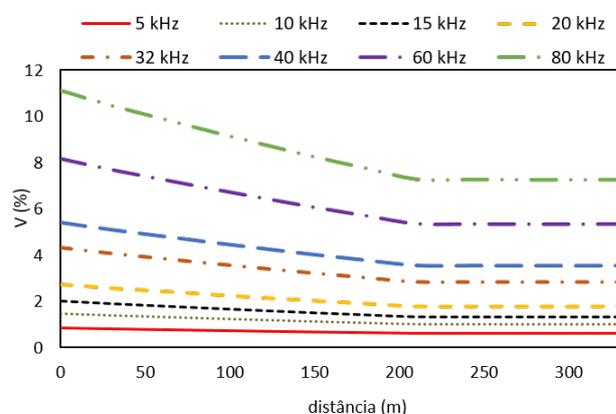


Figura 8. Distorção harmônica de alta frequência ao longo da rede para as fontes supra-harmônicas para o caso B.

uma reatância indutiva aumentando proporcionalmente à frequência. Também é possível notar uma atenuação linear da tensão supra-harmônica até a barra B1, dessa barra em diante o valor é mantido aproximadamente constante.

A Figura 9 apresenta os resultados para o caso C, nas duas condições supracitadas. Nesse caso, observa-se os maiores valores percentuais de tensão supra-harmônica por barra, dentre todos os outros analisados. Com a inserção da compensação reativa esse valores foram atenuados consideravelmente principalmente na barra B1 onde foi inserido o banco de capacitores.

A Figura 10 apresenta os resultados por barra para o caso D. Observa-se para esse caso, assim como nos outros, que os maiores valores percentuais de tensão supra-harmônica foram encontrados na barra onde foi alocada a fonte perturbadora (barra B2). Na condição com a compensação reativa, observa-se que a barra com o banco de capacitores absorveu quase totalmente a tensão supra-harmônica não a deixando propagar para as barras vizinhas.

A Figura 11 apresenta os resultados por barra para o último caso, situação com a fonte supra-harmônica no barramento do transformador. Observa-se para esse caso valores aproximadamente constantes ao longo das barras. Na condição com a consideração do banco de capacitores,

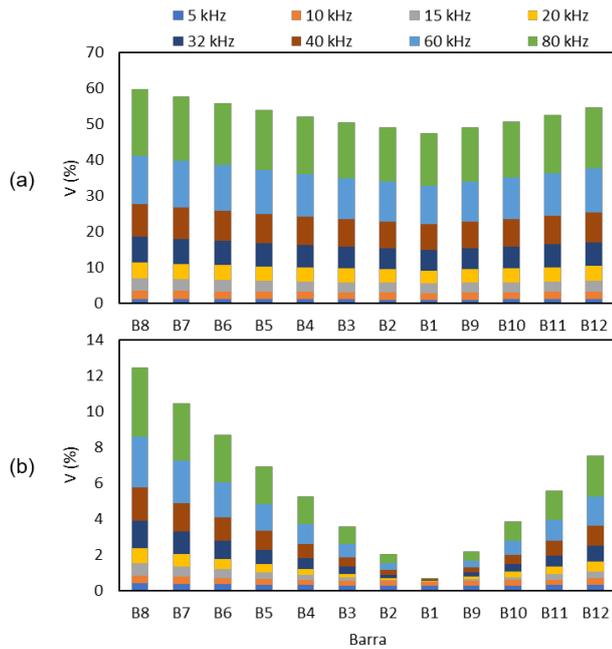


Figura 9. Distorção harmônica de alta frequência em cada barra para as fontes de supra-harmônicas para o caso C: (a) sem o banco de capacitores; (b) com o banco de capacitores na barra.

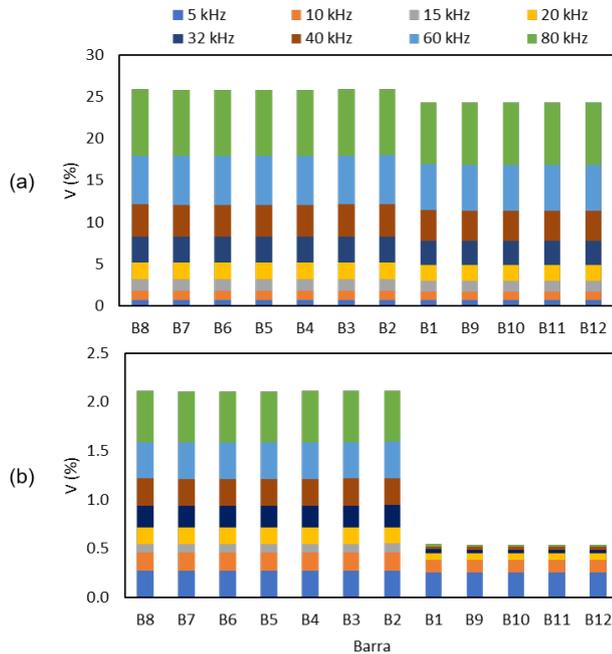


Figura 10. Distorção harmônica de alta frequência em cada barra para as fontes de supra-harmônicas para o caso D: (a) sem o banco de capacitores; (b) com o banco de capacitores na barra.

este caso apresentou a maior atenuação por barra dentre todos os outros analisados.

A condição da compensação reativa foi considerada para todos os casos, apesar dos gráficos apresentarem o resultado apenas para os três últimos. A Tabela 4 apresenta

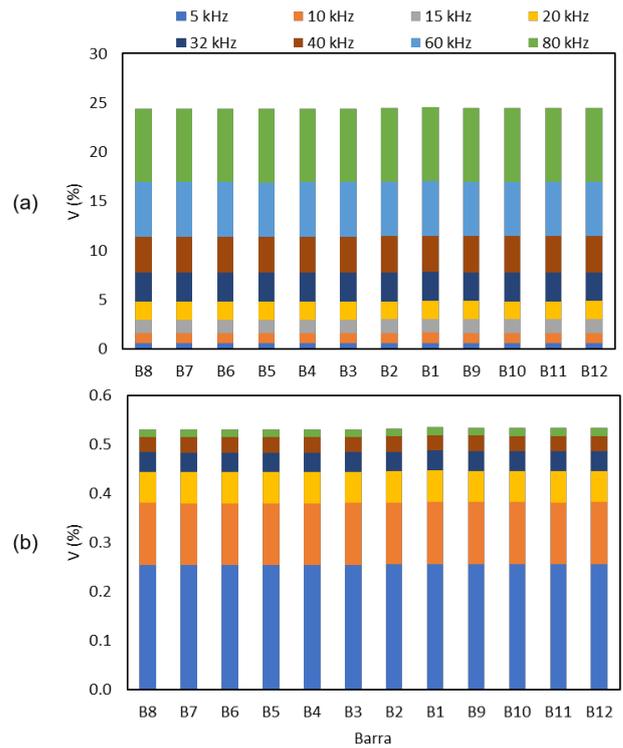


Figura 11. Distorção harmônica de alta frequência em cada barra para as fontes de supra-harmônicas alocadas na barra do transformador: (a) sem o banco de capacitores; (b) com o banco de capacitores na barra.

a média da porcentagem de redução da distorção supra-harmônica para cada frequência evidenciando uma atenuação expressiva para todos os cinco casos analisados.

Tabela 4. Porcentagem de redução da tensão supra-harmônica com a inserção do banco de capacitores.

Caso	Frequência (kHz)							
	5	10	15	20	32	40	60	80
A	58%	84%	95%	92%	94%	94%	95%	95%
B	56%	78%	88%	88%	87%	87%	87%	87%
C	72%	85%	90%	91%	90%	90%	90%	90%
D	58%	85%	96%	94%	95%	95%	96%	96%
E	59%	88%	100%	97%	99%	99%	100%	100%

5. CONCLUSÃO

O enfoque deste artigo foi analisar a propagação de tensões supra-harmônicas em uma rede de distribuição de baixa tensão através de testes em um inversor fotovoltaico e de simulações pelo MATLAB[®]. Os resultados das medições no inversor constataram que as emissões supra-harmônicas provocadas pelas correntes de alta frequência não se propagam pela rede devido as capacitâncias intrínsecas dos condutores elétricos. Para as simulações, uma rede de distribuição baixa tensão foi modelada e o seu comportamento analisado com a injeção de correntes supra-harmônicas alocadas em diferentes barramentos. Os resultados corroboraram com a literatura já existente sobre o tema, evidenciando a influência da impedância da rede e da frequência na propagação das tensões supra-harmônicas.

Ademais, assim como nos testes na rede elétrica real, as supra-harmônicas simuladas foram atenuadas ao longo do sistema, sendo essa atenuação mais expressiva após a inserção do banco de capacitores trifásico em uma das barras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de fomento de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Alfalahi, S.T., Alkahtani, A.A., Al-Shetwi, A.Q., Al-Ogaili, A.S., Abbood, A.A., Mansor, M.B., and Fazea, Y. (2021). Supraharmonics in power grid: Identification, standards, and measurement techniques. *IEEE Access*.
- Emanuel, A. and McEachern, A. (2013). Electric power definitions: A debate. *Proceedings of the IEEE Power Energy Society (PES) General Meeting*.
- Espín-Delgado, Á., Busatto, T., Ravindran, V., Rönnberg, S.K., and Meyer, J. (2020). Evaluation of supraharmonic propagation in lv networks based on the impedance changes created by household devices. In *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, 754–758. IEEE.
- Jiang, L., Ye, G., Xiang, Y., Cuk, V., and Cobben, J. (2015). Influence of high frequency current harmonics on (smart) energy meters. In *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1–5. IEEE.
- Klatt, M., Meyer, J., Schegner, P., Koch, A., Myrzik, J., Darda, T., and Eberl, G. (2013). Emission levels above 2 khz-laboratory results and survey measurements in public low voltage grids.
- Meyer, J., Haehle, S., and Schegner, P. (2013). Impact of higher frequency emission above 2khz on electronic mass-market equipment.
- Meyer, J., Khokhlov, V., Klatt, M., Blum, J., Waniek, C., Wohlfahrt, T., and Myrzik, J. (2018). Overview and classification of interferences in the frequency range 2–150 khz (supraharmonics). In *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 165–170. IEEE.
- Mueller, S., Moeller, F., Klatt, M., Meyer, J., and Schegner, P. (2017). Impact of large-scale integration of e-mobility and photovoltaics on power quality in low voltage networks. In *International ETG Congress 2017*, 1–6. VDE.
- Rönnberg, S. and Bollen, M. (2016). Power quality issues in the electric power system of the future. *The electricity journal*, 29(10), 49–61.
- Slangen, T., van Wijk, T., Čuk, V., and Cobben, S. (2020). The propagation and interaction of supraharmonics from electric vehicle chargers in a low-voltage grid. *Energies*, 13(15), 3865.
- Waniek, C., Wohlfahrt, T., Myrzik, J.M., Meyer, J., Klatt, M., and Schegner, P. (2017). Supraharmonics: Root causes and interactions between multiple devices and the low voltage grid. In *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 1–6. IEEE.