

Problema Emergente das Distorções entre 2 e 150 kHz em Redes Elétricas: Levantamento Bibliográfico^{*}

João I. Y. Ota^{*} Rafael Kotchetkoff Carneiro^{*}
João Pedro Aguiar^{*} Fernando Cesar Rufino^{*}
José Antenor Pomilio^{*}

^{*} Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Campinas-SP, Brasil
(email: {yutaka, antenor}@fee.unicamp.br)

Abstract: Many publications have dealt with the distortions in the 2-150 kHz frequency range caused by the increasing number of power electronics converters and similar devices connected to the distribution power systems. This paper presents a brief literature review in Portuguese language on issues related to the so-called “supraharmonics”, aiming to spread the knowledge related to it among researchers and power utilities in Brazil.

Resumo: Diversas publicações têm abordado a questão das distorções na faixa entre 2 a 150 kHz devido à presença cada vez maior de conversores eletrônicos de potência e soluções similares em redes elétricas de distribuição. Este artigo apresenta um breve levantamento bibliográfico objetivando a disseminação de conhecimento junto a pesquisadores e concessionárias acerca de temas relacionados às “supraharmônicas”.

Keywords: Distribution Systems; Education; Electromagnetic Compatibility; Power Quality; Supraharmonics.

Palavras-chaves: Compatibilidade Eletromagnética; Educação; Qualidade de Energia Elétrica; Sistemas de Distribuição; Supraharmônicas.

1. INTRODUÇÃO

Embora não seja evidente, pode-se dizer que a presença crescente de perturbações na faixa entre 2 e 150 kHz está relacionada com a necessidade de atender normas relativas à emissão de harmônicos pelos equipamentos ligados à rede elétrica. Uma das soluções para cumprimento de tais regras consiste na inserção de circuitos de correção ativa de fator de potência (*Power Factor Correction*-PFC) em aparelhos conectados na rede e no uso de conversores eletrônicos de potência (CEPs) que trabalham com técnicas baseadas em modulação por largura de pulso (*Pulse-Width Modulation*-PWM), as quais resultam em comutações com frequências na ordem de dezenas de kHz. De acordo com as normas vigentes, essa frequência resultante da comutação não se encaixa na faixa de harmônicas e sequer na faixa de compatibilidade eletromagnética (EMC), mas encontra-se na faixa de frequência usada para transmissão de dados pela estrutura física da rede elétrica, sistema conhecido como *Power Line Communication* (PLC). As emissões conduzidas em redes elétricas podem ser divididas em emissão *intencional* ou *não-intencional* no contexto de PLC. Resumidamente, emissões intencionais são geradas por certos equipamentos e têm o objetivo de transmitir dados pela estrutura física da rede elétrica, enquanto emissões não-

intencionais englobam qualquer emissão sem o objetivo de transmissão de dados, na qual seriam inclusas as componentes de frequência originadas por cargas eletrônicas e CEPs.

Apesar de pesquisas recentes abordarem de maneira mais incisiva as emissões não-intencionais na faixa entre 2 e 150 kHz (Rönnberg *et al.*, 2017; Waniek *et al.*, 2017; Fernandez *et al.*, 2019), pesquisadores e engenheiros de eletrônica de potência já possuíam o entendimento que circuitos PFC e CEPs (Unger, 2010) gerariam distúrbios na faixa de algumas dezenas de kHz, a depender da modulação e controle implementados. O recente aumento da presença de aparelhos com circuito PFC e de conversores eletrônicos de potência conectados à rede de distribuição é o que tem contribuído para o surgimento de problemas relacionados a supraharmônicas.

Há várias publicações em língua inglesa a respeito de *supraharmonics*, porém pouco ainda se encontra divulgado em língua portuguesa. Considerando-se esse contexto e as pesquisas que vêm sendo realizadas no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes (LabREI) da FEEC-Unicamp, este artigo procura apresentar um breve levantamento bibliográfico dos temas relacionados às distorções na faixa entre 2 e 150 kHz em redes elétricas.

^{*} Este trabalho teve o apoio financeiro da FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP Processo 2016/08645-9 e FAPESP Processo 2018/13993-1).

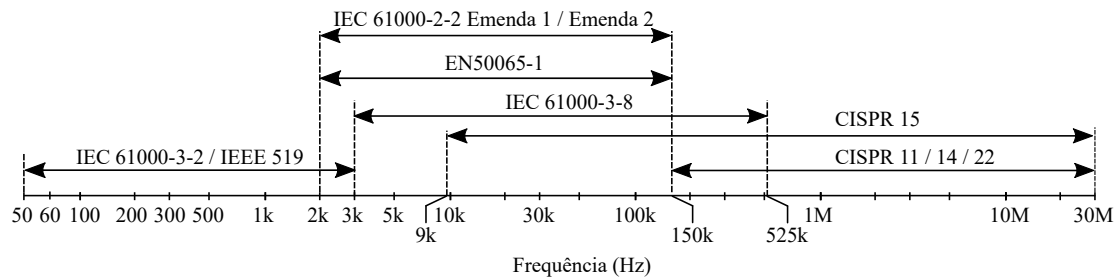


Figura 1. Algumas normas que tratam de limites de emissões por equipamento ou de distorções de tensão e suas respectivas faixas de frequência. Limites de emissão não foram inclusos.

2. NOMENCLATURA E NORMALIZAÇÃO

Normas da *International Electrotechnical Commission* (IEC) estabelecem atualmente limites de emissão não-intencional para a faixa de harmônicas e para a faixa de compatibilidade eletromagnética (EMC). A norma IEC 61000-3-2 estabelece limites de emissão de corrente na faixa de harmônicos até a 40ª ordem. Por sua vez, a recomendação IEEE 519 define limites de emissão até a 50ª ordem. Normas da *Comité international spécial des perturbations radioélectriques* (CISPR), parte integrante da IEC, estabelecem os limites de EMC conduzida para a faixa entre 150 kHz e 30 MHz para equipamentos industriais, científicos e médicos (CISPR 11), para aparelhos de uso doméstico (CISPR 14) e equipamento de TI (CISPR 22). Embora nesta revisão apenas as emissões conduzidas sejam citadas, ressalta-se que as normas também englobam as emissões irradiadas.

Distorções na faixa entre 2 a 150 kHz têm sido classificadas como “*high-frequency distortion*” ou “*high-frequency harmonics*”, assim como “*low-frequency EMC*” na literatura. De acordo com Bollen *et al.* (2014), em 2013 pela primeira vez cunhou-se o termo “supraharmônicas” (*supraharmónics*) por Emanuel *et al.* (2013), o qual será o termo utilizado neste artigo.

Há recomendações e normas para emissões intencionais e não-intencionais na faixa das supraharmônicas, as quais são voltadas a equipamentos que transmitem informação via *Power Line Communication* (PLC) e a equipamentos de iluminação. A norma EN50065-1 estabelece limites para a emissão intencional e não-intencional por equipamentos transmissores de informação em redes de baixa tensão nas faixas entre 3 e 148,5 kHz, enquanto a norma IEC 61000-3-8 estabelece limites para a emissão não-intencional na faixa entre 3 e 525 kHz. A norma CISPR 15 estabelece limites de emissão não-intencional conduzida para lâmpadas e equipamento de iluminação na faixa entre 9 kHz e 30 MHz. Propostas para o estabelecimento de normas de emissões não-intencionais por outros equipamentos foram propostas por Larsson *et al.* (2009) e reforçadas por Bollen *et al.* (2014). Em 2017, a Emenda 1 da norma IEC 61000-2-2 estabeleceu limites de distorção de tensão causadas por emissões conduzidas não-intencionais para a faixa entre 2 e 30 kHz e níveis de compatibilidade para sinais de sistemas de comunicação de rede até 150 kHz. Recentemente, limites para distorções de tensão na faixa entre 30 e 150 kHz foram inclusos em Emenda 2 da mesma norma (Rönnerberg *et al.*, 2017; Meyer *et al.*, 2018). Porém, tais emendas não

citam a emissão de ruídos por equipamentos que não sejam de comunicação, cujos limites ainda estão em discussão.

A Figura 1 resume as faixas de frequência de harmônicas, supraharmônicas e EMC nas quais as normas citadas atuam. Decidiu-se por não consolidar aqui seus respectivos limites, uma vez que elas tratam individualmente tanto a emissão por equipamento quanto a distorção de tensão resultante. As normas de interesse devem ser acessadas para verificação de limites determinados.

3. EMISSÃO E PROPAGAÇÃO DE SUPRAHARMÔNICAS

3.1 Emissão Primária e Emissão Secundária

Rönnerberg *et al.* (2011b) propõe a classificação das emissões supraharmônicas detectadas em um dado equipamento ou aparelho em emissões *primárias* e *secundárias*.

- Emissão primária é a parcela da corrente que se origina da própria estrutura interna do aparelho em questão.
- Emissão secundária é a parcela da corrente do aparelho em questão que se origina devido à estrutura interna de outro aparelho conectado à rede elétrica ou devido a própria rede elétrica.

Estabelece assim um modelo simplificado para a análise de supraharmônicas. Análises têm mostrado que uma parte significativa da emissão mensurada na faixa de supraharmônicas em equipamentos é devido à emissão secundária (Rönnerberg *et al.*, 2011a; Gil-de-Castro *et al.*, 2014; Meyer *et al.*, 2018). Em outras palavras, supraharmônicas possuem tendência de surgirem devido a iterações da rede e de seus diversos aparelhos, os quais são resultantes de fenômenos de ressonância e interferência.

3.2 Emissão por Cargas Eletrônicas

Pesquisas iniciais em supraharmônicas abordaram os efeitos por cargas eletrônicas, tais como as lâmpadas fluorescente compactas (*compact fluorescent lamp*-CFL). Larsson *et al.* (2010a) apresentam resultados de medição de 1 até 48 CFLs em uma instalação elétrica. Estudos preliminares envolvendo o uso de lâmpadas LED por Busatto *et al.* (2016) mostram que a emissão de supraharmônicas são maiores que CFL, embora os possíveis efeitos adversos não estejam claros. Sakar *et al.* (2019) apresentam uma metodologia para verificação da influência das emissões secundárias em lâmpadas LED individualmente.

3.3 Emissão devido a Conversores Eletrônicos de Potência

CEPs são fontes de supraharmônicas, uma vez que sintetizam corrente através de comutações na faixa de kHz. Nos últimos anos, observou-se um aumento de CEP conectados à redes elétricas de distribuição, principalmente devido à expansão da geração distribuída e de sistemas fotovoltaicos. Consequentemente, sistemas fotovoltaicos têm sido um dos principais alvos na averiguação do aumento da presença de supraharmônicas em redes de distribuição nos últimos anos, das quais podem ser destacados os resultados por Schöttke *et al.* (2014); Chicco *et al.* (2015); Klatt *et al.* (2013, 2016); Darmawardana *et al.* (2018); Langella *et al.* (2016); Varatharajan *et al.* (2014). Eletropostos têm sido medidos, uma vez que também consistem em CEPs (Meyer *et al.*, 2016). Supraharmônicas são vistas na faixa de 8, 16, e 20 kHz para sistemas fotovoltaicos e de 100 kHz para eletropostos, corroborando a tese que tais componentes têm origem da comutação das chaves semicondutoras. Fernandez *et al.* (2019) realizam um estudo intensivo, onde são listadas a emissão de diversas fontes renováveis de energia e suas emissões não-intencionais até 500 kHz.

A Figura 2 apresenta medidas de tensão e corrente de um inversor trifásico de um sistema fotovoltaico localizado na FEEC-Unicamp, realizadas pela equipe do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes (LabREI) (Pomilio *et al.*, 2019; Carneiro *et al.*, 2020). O sistema é composto por 3 inversores fotovoltaicos trifásicos, cada um com potência nominal de 15 kW, e 1 inversor fotovoltaico monofásico de 8 kW. Observa-se que em Fig. 2(a) e (b), a corrente apresenta uma distorção na faixa de 20 kHz, que é identificada no espectro da Figura 2(c). Embora as medidas tenham sido tomadas no mesmo momento, com geração de 43 kW, a amplitude da componente de 20 kHz na corrente e na tensão em Fig. 2(b) é aproximadamente 8 A e 6 V, enquanto que em Fig. 2(a) é aproximadamente 3 A e 4 V. O tempo de variação entre as duas situações é de aproximadamente 10 segundos. Necessita-se de mais investigações para averiguar sua origem, embora provavelmente esteja relacionada com a interação entre os múltiplos inversores da instalação.

4. EFEITOS ADVERSOS DEVIDO A SUPRAHARMÔNICAS

4.1 Interferência em PLC

A interferência plausível de equipamentos PLC com as supraharmônicas estimulou as pesquisas de distúrbios na faixa de 2 a 150 kHz. Rönnberg *et al.* (2011b) resumem as possíveis interferências entre equipamentos com emissões intencionais e não-intencionais em cinco tipos de interferência, e Meyer *et al.* (2018) exemplificam como equipamentos de comunicação são afetados por emissões não-intencionais e também como outros equipamentos podem ser afetados pela emissão intencional de equipamentos de comunicação. Torquato *et al.* (2016), porém, cita que as distorções supraharmônicas seriam pequenas quando comparadas à magnitude dos sinais de comunicação PLC. Fernandez *et al.* (2019) recomenda que protocolos de comunicação e técnicas robustas de transmissão sejam desenvolvidas e testadas em ambientes reais, enquanto emissões não-intencionais sejam reduzidas afim de reduzir efeitos

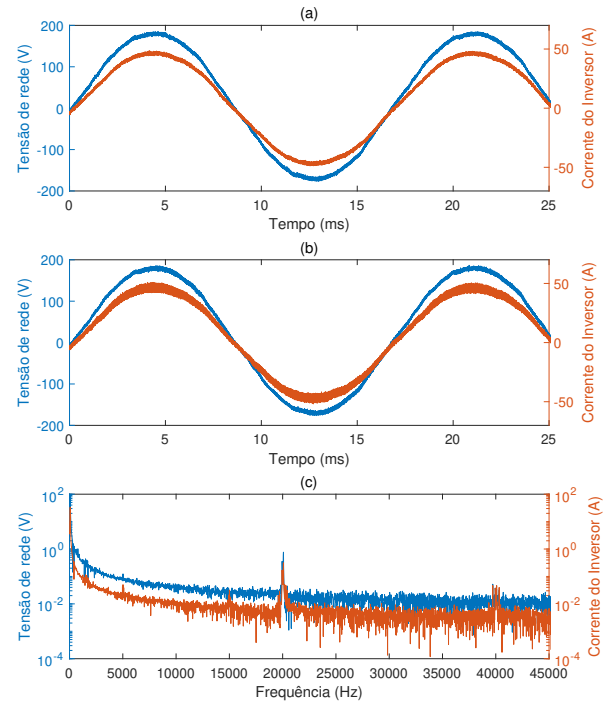


Figura 2. Medições de tensão e corrente em inversor fotovoltaico na FEEC-Unicamp. (a) Componente de 20 kHz de corrente com magnitude mínima. (b) Componente de 20 kHz de corrente com magnitude máxima. (c) Espectro da corrente e da tensão para o caso de distorção com magnitude máxima.

adversos na transmissão de dados. Não obstante, observa-se que a ausência de normas de emissão não-intencional dificulta uma melhor avaliação dos efeitos adversos em PLC.

4.2 Efeitos na Rede de Distribuição Primária

Estudos apontam que as supraharmônicas geradas em redes de distribuição secundária não tendem a se propagar para a rede de distribuição primária, uma vez que a distorção da tensão devido à supraharmônicas sofre expressiva atenuação (Torquato *et al.*, 2016; Gil-de-Castro *et al.*, 2014). Dois fatores principais para essa conclusão são apresentados por Torquato *et al.* (2016): a alta impedância de transformadores e cabos, e a presença filtros de EMC de baixa impedância em equipamentos eletrônicos.

Porém, outros estudos têm mostrado que efeitos de ressonância podem confinar as supraharmônicas e amplificá-las nas instalações onde surgem (Klatt *et al.*, 2013; Gil-de-Castro *et al.*, 2014; Meyer *et al.*, 2018). Dessa forma, ainda que essas distorções não se propaguem para a rede primária da distribuidora de energia, os consumidores e equipamentos na rede secundária ainda estão susceptíveis a possíveis efeitos adversos das supraharmônicas. Há problemas relatados mesmo na rede primária de distribuição e em instalações industriais (Unger, 2010). Paulsson *et al.* (2003) apresenta o caso do sistema *back-to-back Eagle Pass* com tensão nominal de 24 kV, no qual foi averiguado que curto-circuitos fase-terra no interior dos terminais de cabos foram causados pelo rompimento da isolamento devido à presença de distorções de tensão com frequência de 12,4 kHz e magnitude de até 3 kV.

4.3 Tempo de Vida de Equipamentos

Filtros de EMC estão presentes em equipamentos eletrônicos. O aumento de componentes de alta frequência tem um efeito direto no tempo de vida de seus componentes, especialmente os capacitores (Sonerud *et al.*, 2009; Darmawardana *et al.*, 2019), dado que supraharmônicas tendem a se confinar dentro de uma instalação, aumentando as emissões secundárias.

4.4 Medidores de Energia

Primeiros relatos de erros de medidas em medidores inteligentes de energia (*smart meters*) devido à supraharmônicas são citados por Kirchhof *et al.* (2009), os quais reportam erros de até 20% na medição de energia em sistemas fotovoltaicos. Kotsampopoulos *et al.* (2017) e Jiang *et al.* (2015) detalham sobre a influência de supraharmônicas e EMC em medidores. Trata-se de um problema complexo, pois soluções baseadas na imunidade de medidores seriam muito custosas. Um caminho mais plausível é a definição de níveis de compatibilidade entre medidores e equipamentos diversos na rede elétrica (Kotsampopoulos *et al.*, 2017).

4.5 Mitigação de supraharmônicas

Propostas de mitigação de supraharmônicas foram apresentadas por Rönnberg *et al.* (2015) e Rönnberg *et al.* (2017), nos quais o uso de conversores multiníveis e de métodos alternativos ao PWM tradicional são sugeridos com o objetivo de reduzir o espectro resultante da comutação dos CEPs na rede elétrica. Outra proposta é a utilização de filtros, o quais se provam eficazes na faixa de alguns kHz (Unger, 2010).

5. MÉTODOS PARA MEDIÇÃO E CONFORMIDADE DE SUPRAHARMÔNICAS

5.1 Normatização na Medição de Supraharmônicas

Apesar da adição de faixas de supraharmônicas nas Emendas 1 e 2 da IEC-61000-2-2, informa-se na Emenda 2 que “os métodos de medição dos níveis de perturbação estão fora do escopo deste documento”. Atualmente sugere-se que a medição de supraharmônicas seja feita no contexto dos métodos de medições já existentes nos anexos das IEC-61000-4-7 e IEC-61000-4-30 (Collin *et al.*, 2019), os quais são comparados por Klatt *et al.* (2014). O anexo B da norma IEC 61000-4-7 estabelece procedimentos de medidas para faixas apenas entre 2 e 9 kHz. O anexo C da IEC 61000-4-30 apresenta, em caráter informativo, outras três metodologias para aferir distorções na faixa de 2 e 150 kHz, sendo uma delas a extensão da faixa de operação do anexo B da norma IEC 61000-4-7.

Para frequência a partir de 9 kHz, a CISPR 16 é uma metodologia alternativa que exige o uso de uma impedância padrão de rede, também conhecida por LISN (*Line Impedance Stabilization Network*), Porém, Thomas (2013) alerta que a performance de equipamento em campo pode ser diferente de sua verificação em laboratório, devido às diferenças entre o LISN utilizado e a impedância real da rede. Tal observação justifica-se também pelos diferentes filtros de EMC que são utilizados em equipamentos eletrônicos e trazem efeitos na impedância da rede.

Diversos artigos discutem métodos para medidas de supraharmônicas, a citar Angulo *et al.* (2016); Kotsampopoulos *et al.* (2017); Collin *et al.* (2019); Klatt *et al.* (2014); Mendes *et al.* (2020); Greverer *et al.* (2018); Larsson *et al.* (2013). Entende-se, de forma geral, que as normas atuais da IEC para testes de supraharmônicas são incompletas. Métodos alternativos aos da IEC e da CISPR também têm sido apresentados, tanto na questão do tratamento das medidas (*software*) quanto na questão dos equipamentos necessários para as medidas (*hardware*) (Rodrigues *et al.*, 2018; Mendes *et al.*, 2018; Collin *et al.*, 2019).

5.2 Visualização e Avaliação de Supraharmônicas

Larsson *et al.* (2010b) apresentam o uso de espectrogramas para a visualização de supraharmônicas. Diversos estudos vem mostrando que supraharmônicas, diferentemente de harmônicos, também podem apresentar comportamento variável ao longo do tempo a depender de vários fatores, por exemplo, o modo de operação do equipamento e o nível de potência (Greverer *et al.*, 2017). Tais supraharmônicas apresentam conteúdo espectral que espalha-se por um certo comprimento de banda, e são classificadas como supraharmônicas de *banda larga*. Em contraste, as supraharmônicas com comprimento de banda menor que 5 kHz são classificadas como *banda estreita* (Larsson *et al.*, 2013). Espectrogramas analisam as grandezas elétricas tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, o que possibilita melhor visualização e caracterização de supraharmônicas de banda larga e estreita.

A Figura 3 mostra as diferentes visualizações de uma tensão senoidal simulada contendo uma componente supraharmônica que varia ao longo do tempo. Enquanto o espectrograma permite verificar tanto a transição do sinal modulado na portadora quanto sua banda, apenas sabe-se a sua banda pela análise espectral e a presença do sinal modulado na fundamental é imperceptível visualmente quando visto no domínio do tempo.

6. DESAFIOS E CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou um breve levantamento bibliográfico referente às supraharmônicas. Em especial, esse tema tem extrema relevância dentro do contexto de redes inteligentes (*smartgrids*) e microrredes, principalmente por tais distorções permanecerem confinadas e serem amplificadas nas redes onde surgem. Alguns autores subentendem, assim, que a resolução de supraharmônicas passaria por mudanças nos CEPs (Rönnberg *et al.*, 2017). Porém, deve-se compreender que a coexistência de diferentes equipamentos (geradores, cargas e transmissores para comunicação) em diferentes níveis de potência é inevitável em um ambiente de *smartgrids* e microrredes, os quais exigirão um amplo entendimento de compatibilidade a nível de supraharmônicas entre tais equipamentos. Dentro desse contexto, o LabREI vem investigando a presença e impacto de supraharmônicas nas instalações da FEEC-Unicamp, como parte das pesquisas realizadas em seu âmbito.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Cesar José Bonjuani Pagan por sua colaboração na confecção do artigo. Este trabalho

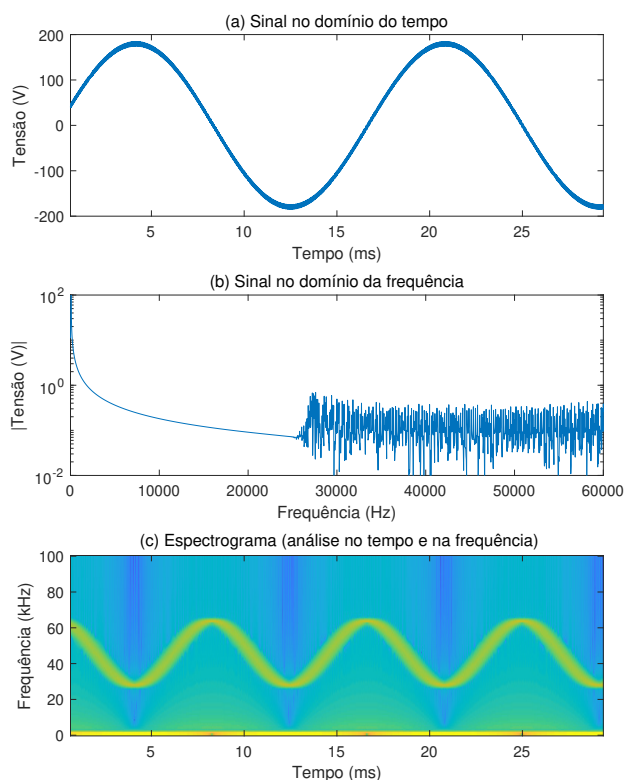


Figura 3. Tensão simulada contendo componente variante no tempo. (a) Visualização no domínio do tempo. (b) Visualização no domínio da frequência. (c) Espectrograma da tensão.

teve financiamento pela FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processo 2018/13993-1). O LabREI e suas pesquisas são financiadas pela FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processos 2016/08645-9).

REFERÊNCIAS

- Angulo, I., Arrinda, A., Fernández, I., Uribe-Pérez, N., Arechalde, I., e Hernández, L. (2016). A review on measurement techniques for non-intentional emissions above 2 kHz. In *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 1–5.
- Bollen, M., Olofsson, M., Larsson, A., Rönnberg, S., e Lundmark, M. (2014). Standards for supraharmónics (2 to 150 kHz). *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 3(1), 114–119.
- Busatto, T., Abid, F., Larsson, A., Bollen, M.H.J., e Singh, G. (2016). Interaction between grid-connected pv systems and led lamps: Directions for further research on harmonics and supraharmónics. In *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 193–197.
- Carneiro, R.K., Ota, J.I.Y., e Pomilio, J.A. (2020). Field measurements of non-intentional emissions above 2 khz in photovoltaic inverter installations. In *29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Delft, The Netherlands.
- Chicco, G., Russo, A., e Spertino, F. (2015). Supraharmónics: Concepts and experimental results on photovoltaic systems. In *2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)*, 1–6.
- Collin, A.J., Djokic, S.Z., Drapela, J., Langella, R., e Testa, A. (2019). Proposal of a desynchronized processing technique for assessing high-frequency distortion in power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(10), 3883–3891.
- Darmawardana, D., Perera, S., Robinson, D., Ciufu, P., Meyer, J., Klatt, M., e Jayatunga, U. (2018). Investigation of high frequency emissions (supraharmónics) from small, grid-tied, photovoltaic inverters of different topologies. In *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 1–6.
- Darmawardana, D., Perera, S., Robinson, D., David, J., Meyer, J., e Jayatunga, U. (2019). Impact of high frequency emissions (2–150 khz) on lifetime degradation of electrolytic capacitors in grid connected equipment. In *2019 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5.
- Emanuel, A. e McEachern, A. (2013). Electric power definitions: A debate. In *Proceedings of the IEEE Power & Energy Society (PES) General Meeting*. Vancouver, BC, Canada. 21–25 July, 2013.
- Fernandez, I., Uribe-Pérez, N., Eizmendi, I., Angulo, I., de la Vega, D., Arrinda, A., e Arzuaga, T. (2019). Characterization of non-intentional emissions from distributed energy resources up to 500 kHz: A case study in Spain. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105, 549 – 563.
- Gil-de-Castro, A., Rönnberg, S.K., e Bollen, M.H.J. (2014). A study about harmonic interaction between devices. In *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 728–732.
- Grevener, A., Meyer, J., Rönnberg, S., Bollen, M., e Myrzik, J. (2017). Survey of supraharmónic emission of household appliances. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017(1), 870–874.
- Grevener, A., Meyer, J., e Roennberg, S. (2018). Comparison of measurement methods for the frequency range 2 – 150 khz (supraharmónics). In *2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 1–6.
- Jiang, L., Ye, G., Xiang, Y., Cuk, V., e Cobben, J.F.G. (2015). Influence of high frequency current harmonics on (smart) energy meters. In *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1–5.
- Kirchhof, J. e Klein, G. (2009). Results of the OPTINOS project—deficits and uncertainties in photovoltaic inverter test procedures. In *24th EU PV SEC Conf. Exhibit*. Hamburg, Germany. Sep. 2009.
- Klatt, M., Meyer, J., e Schegner, P. (2014). Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 khz to 150 khz. In *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 818–822.
- Klatt, M., Meyer, J., Schegner, P., Koch, A., Myrzik, J., Körner, C., Darda, T., e Eberl, G. (2013). Emission levels above 2 khz — laboratory results and survey measurements in public low voltage grids. In *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIREN 2013)*, 1–4.
- Klatt, M., Meyer, J., Schegner, P., e Lakenbrink, C. (2016). Characterization of supraharmónic emission caused by small photovoltaic inverters. In *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution*

- and Energy Conversion (MedPower 2016), 1–6.
- Kotsampopoulos, P., Rigas, A., Kirchhof, J., Messinis, G., Dimeas, A., Hatzargyriou, N., Rogakos, V., e Andreadis, K. (2017). EMC issues in the interaction between smart meters and power-electronic interfaces. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(2), 822–831.
- Langella, R., Testa, A., Djokic, S.Z., Meyer, J., e Klatt, M. (2016). On the interharmonic emission of pv inverters under different operating conditions. In *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 733–738.
- Larsson, A. e Bollen, M. (2013). Towards a standardized measurement method for voltage and current distortion in the frequency range 2 to 150 khz. In *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 1–4.
- Larsson, E.O.A. e Bollen, M.H.J. (2009). Emission and immunity of equipment in the frequency range 2 to 150 kHz. In *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 1–5.
- Larsson, E.O.A. e Bollen, M.H.J. (2010a). Measurement result from 1 to 48 fluorescent lamps in the frequency range 2 to 150 kHz. In *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, 1–8.
- Larsson, E.O.A., Bollen, M.H.J., Wahlberg, M.G., Lundmark, C.M., e Rönnerberg, S.K. (2010b). Measurements of high-frequency (2–150 khz) distortion in low-voltage networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3), 1749–1757.
- Mendes, T.M., Duque, C.A., Silva, L.R.M., Ferreira, D.D., Ribeiro, P.F., Meyer, J., e Greverner, A. (2018). Supraharmonic analysis using subsampling. In *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 1–5.
- Mendes, T.M., Duque, C.A., da Silva, L.R.M., Ferreira, D.D., Meyer, J., e Ribeiro, P.R. (2020). Comparative analysis of the measurement methods for the supraharmonic range. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105801.
- Meyer, J., Khokhlov, V., Klatt, M., Blum, J., Waniek, C., Wohlfahrt, T., e 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.
- Meyer, J., Mueller, S., Ungethuem, S., Xiao, X., Collin, A., e Djokic, S. (2016). Harmonic and supraharmonic emission of on-board electric vehicle chargers. In *2016 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T D-LA)*, 1–7.
- Paulsson, L., Ekehov, B., Halen, S., Larsson, T., Palmqvist, L., Edris, A., Kidd, D., Keri, A.J.F., e Mehraban, B. (2003). High-frequency impacts in a converter-based back-to-back tie; the Eagle Pass installation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(4), 1410–1415.
- Pomilio, J.A., Ota, J.I.Y., do Val, J.B.R., Ruppert Fo., E., Lyra Fo., C., Marafão, F.P., Freitas, W., Dotta, D., Ferreira, P.A.V., Villalva, M.G., Mendes, L.S., Rothenberg, C.E., Sguarezi Fo., A.J., Gonçalves, F.A.S., Paredes, H.K.M., Godoy, E.P., Guillard Jr., H., e Guerreiro, J.F. (2019). Pesquisas interdisciplinares em redes inteligentes de energia elétrica. In *3o Simposio Iberoamericano em Microrredes Inteligentes con Integración de Energías Renovables*. Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. 1 a 4 de setembro de 2019.
- Rodrigues, C.E.M., Mota Soares, T., e de Lima Tostes, M.E. (2018). Characterization of supraharmonics using the wavelet packet transform. In *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 1–6.
- Rönnerberg, S.K., Bollen, M.H.J., e Wahlberg, M. (2011a). Interaction between narrowband power-line communication and end-user equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(3), 2034–2039.
- Rönnerberg, S.K., Castro, A.G., Bollen, M.H.J., Moreno-Munoz, A., e Romero-Cadaval, E. (2015). Supraharmonics from power electronics converters. In *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, 539–544.
- Rönnerberg, S.K., Larsson, A., Bollen, M., e Schanen, J.L. (2011b). A simple model for interaction between equipment at a frequency of some tens of khz. In *Proceedings of CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution* :, CIRED Conference Proceedings.
- Rönnerberg, S.K., Bollen, M.H.J., Amaris, H., Chang, G.W., Gu, I.Y.H., Lukasz H. Kocewiak, Meyer, J., Olofsson, M., Ribeiro, P.F., e Desmet, J. (2017). On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz–150 kHz—review and research challenges. *Electric Power Systems Research*, 150, 1 – 10.
- Sakar, S., Rönnerberg, S., e Bollen, M. (2019). Interferences in AC–DC LED drivers exposed to voltage disturbances in the frequency range 2–150 kHz. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(11), 11171–11181.
- Schöttke, S., Meyer, J., Schegner, P., e Bachmann, S. (2014). Emission in the frequency range of 2 kHz to 150 kHz caused by electrical vehicle charging. In *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 620–625.
- Sonerud, B., Bengtsson, T., Blennow, J., e Gubanski, S.M. (2009). Dielectric heating in insulating materials subjected to voltage waveforms with high harmonic content. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(4), 926–933.
- Thomas, D. (2013). Conducted emissions in distribution systems (1 kHz–1 MHz). *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2(2), 101–104.
- Torquato, R., Xu, W., Freitas, W., Lepka, J., e Pascal, R. (2016). Propagation characteristics of high-frequency harmonics in distribution systems. In *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5.
- Unger, C. (2010). Frequencies above the harmonic range - challenge of the future? In *2010 Conference Proceedings IPEC*, 763–766.
- Varatharajan, A., Schöttke, S., Meyer, J., e Abart, A. (2014). Harmonic emission of large pv installations case study of a 1 mw solar campus. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)*, volume 1-12. RE&PQJ.
- Waniek, C., Wohlfahrt, T., Myrzik, J.M.A., Meyer, J., e Schegner, P. (2017). Topology identification of electronic mass-market equipment for estimation of lifetime reduction by HF disturbances above 2 kHz. In *2017 IEEE Manchester PowerTech*, 1–6.