

AVALIAÇÃO DO IMPACTO HARMÔNICO DE CORRENTE DEVIDO À INSERÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS À REDE ELÉTRICA

EVANDRO A. DE F. NUNES*, LUIZ F. DE Q. SILVEIRA*, DENIS K. ALVES*, EVERTON DA S. DANTAS*,
GUILHERME A. P. DE C. A. PESSOA†

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação - PPGEEC, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN - Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

†Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN - Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

Emails: efreitasnunes@gmail.com, lfelipe@dca.ufrn.br, alvesk3@hotmail.com, everttondantas@gmail.com, guilhermepillon@hotmail.com

Abstract— Currently, there is growing attention to distributed generation systems integration problems to the utility grid, especially when their capacity becomes equivalent to the main grid rated capacity. There is a huge amount of studies regarding to the power quality on the distributed generators point of connection. However, these studies address present problems in external scenarios. Therefore, due to the increased acquisition of photovoltaic systems in Brazil and also the absence of a national standard that guides the system connections, it is necessary to perform an adequacy of the studies studies in photovoltaic systems taking into account the possible problems that may arise in the utility grid. The impact on the utility grid due to photovoltaic generation units connection, under different levels of penetration, with respect to current harmonic distortions is evaluated. A 8 kWp three-phase photovoltaic operation connected to the common coupling point of a 15 kVA substation is operated and analysis are performed by means a recursive algorithm for estimating phasors. Through experimental results, the index is estimated in real-time and compared with the international standard established by the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE).

Keywords— Power Quality, Distributed Generation, Photovoltaic Systems, Photovoltaic Penetration, Recursive Phasor Estimation.

Resumo— Atualmente, há uma crescente atenção aos problemas de integração de sistemas de geração distribuída à rede elétrica, principalmente quando a potência instalada desses sistemas torna-se equiparável à potência do sistema convencional de distribuição de energia elétrica. Existe uma extensa quantidade de estudos no que diz respeito à qualidade da energia elétrica (QEE) no ponto de conexão dos geradores distribuídos. No entanto, esses estudos abordam problemas presentes em cenários no exterior. Assim, com o aumento do interesse na instalação de sistemas fotovoltaicos no Brasil e também a ausência de uma normativa nacional que padronize a conexão desses sistemas, é necessário realizar uma adequação dos estudos em sistemas fotovoltaicos levando em consideração os possíveis problemas que podem surgir nas redes de distribuição de energia elétrica nacionais. Neste trabalho é avaliado o impacto na rede de distribuição de energia elétrica decorrente da conexão de unidades de geração fotovoltaica, no que diz respeito às distorções harmônicas de corrente em vários níveis de penetração. Nesse intuito, é realizado um estudo de caso que consiste em operar uma planta fotovoltaica trifásica de 8 kWp conectada ao ponto de acoplamento comum de uma subestação com potência nominal de 15 kVA. A análise é realizada com auxílio de um algoritmo de estimação fasorial implementado recursivamente. Por meio de resultados experimentais, o indicador é estimado durante a operação do sistema fotovoltaico e comparado com o padrão internacional estabelecido pelo IEEE (do inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

Palavras-chave— Qualidade da Energia Elétrica, Geração Distribuída, Sistemas Fotovoltaicos, Penetração Fotovoltaica, Estimação Recursiva de Fasores.

1 Introdução

Atualmente, os incentivos à geração de energia elétrica, por meio de fontes consideradas limpas, vêm aumentando consideravelmente devido à escassez dos combustíveis fósseis, até então utilizados em abundância. Em paralelo, unidades de geração distribuída que utilizam fontes renováveis ganham força com a diminuição dos impostos aplicados sobre os componentes constituintes dos sistemas de geração, que utilizam este tipo de fonte de energia (Nakabayashi, 2014). No entanto, a qualidade da energia elétrica (QEE) tem sido severamente afetada pelo crescente número de sistemas de geração distribuídos conectados às redes de distribuição de baixa tensão (Begovic et al., 2001).

Os sistemas de geração fotovoltaicos (SGFV) conectados à rede elétrica são compostos por conversores de potência, predominantemente constituídos por IGBTs (do inglês, *Insulated Gate Bipolar Transistor*) e MOSFETs (do inglês, *Metal Oxide Semiconductor*).

Field Effect Transistor). A utilização destes dispositivos eletrônicos nas redes de distribuição gera deformidades nas formas de onda de tensão e corrente (Rocha, 2015), gerando distúrbios no ponto de vista da QEE. Dentre outros aspectos, o que mais dificulta o controle da QEE, quando SGFVs são conectados às redes de distribuição de energia elétrica, é a natureza intermitente de sua geração de energia elétrica, que pode causar sérios problemas, tais como: sobreensões, afundamentos de tensão, desequilíbrio de tensão e corrente entre fases, emissão de *flicker* e harmônicos e interharmônicos de tensão e corrente (Katiraei and Aguero, 2011). Cabe às concessionárias de energia elétrica fiscalizar se os SGFVs conectados à rede de distribuição de energia elétrica atendem aos requisitos mínimos determinados pelas normas de regulação da QEE.

Componentes harmônicas presentes nas tensões e correntes do sistema elétrico são sinais de frequência múltipla inteira da componente fundamental que,

quando sobrepõem a componente fundamental, deformam o sinal e deterioram a QEE. A existência desse tipo de distúrbio aumenta a probabilidade de ressonância na rede elétrica e estima-se que em torno de 25% do total de distúrbios do sistema elétrico sejam oriundos de harmônicos (Shah et al., 2015). Isto torna esse distúrbio responsável por grandes perdas de potência na indústria de energia elétrica.

A emissão de harmônicos provenientes de instalações fotovoltaicas depende diretamente do tipo de conversor de potência utilizado, filtros de conexão com a rede elétrica, e, principalmente, da estratégia de controle adotada (Chidurala et al., 2014). Além disso, a interação dos conversores com cargas não-lineares conectadas à rede elétrica pode gerar perdas nas linhas de transmissão devido ao fluxo de componentes harmônicas de corrente. Estudos realizados pelos autores, demonstram que o nível de distorção das correntes varia em uma relação de rampa inversa com a irradiância instantânea: durante os períodos de irradiância máxima o sistema tende a fornecer correntes com baixa distorção harmônica devido ao aumento da componente fundamental da corrente elétrica. Já a distorção harmônica das tensões sofre pouca influência devido a esta variação. Além disso, de acordo com os autores em (Awadallah et al., 2015), os harmônicos gerados por sistemas fotovoltaicos têm natureza aditiva e dependem da concentração de harmônicos requisitados por cargas não-lineares.

Cada país é livre para criar ou adotar um conjunto de normas que governem a QEE gerada por sua matriz energética. No continente europeu as normas do padrão IEC (do inglês, *International Electrotechnical Commission*) são as mais utilizadas. Já a América do Norte, em geral, adota o padrão IEEE. No Brasil, por sua vez, são empregados os módulos 3 e 8 dos procedimentos de distribuição (PRODIST) que tratam do acesso ao sistema de distribuição e da qualidade da energia, respectivamente (ANEEL, 2015a), (ANEEL, 2015b). Em relação à QEE, o módulo 8 do PRODIST referencia valores para a distorção harmônica total de tensão (DHTT) e também para a distorção harmônica individual de tensão (DHTI). No entanto, a norma não descreve valores de referência ou limites em indicadores para a distorção harmônica de corrente. Para sistemas fotovoltaicos de potência nominal inferior a 10 kWp, a norma IEEE 1547 impõe o limite de 5% para a THD de corrente (IEEE, 2009).

Este trabalho tem como objetivo analisar a relação entre a distorção harmônica de corrente com o nível de penetração de um sistema de geração fotovoltaico trifásico, em que o conversor é controlado no referencial síncrono e opera garantindo fator de potência unitário no ponto de acoplamento comum (PAC), ou seja, a potência reativa entregue à rede elétrica é próxima a zero. A estimação dos indicadores de distorção harmônica é realizada em tempo real por meio de um algoritmo recursivo de estimação fasorial.

As demais sessões deste artigo estão organizadas da seguinte maneira: Seção 2 apresenta os detalhes

técnicos do protótipo utilizado para os estudos de impacto. Seção 3 descreve a ferramenta matemática adotada neste trabalho, bem como a formulação dos cálculos para avaliação do impacto. Seção 4 apresenta a validação da ferramenta frente a sinais simulados. Seção 5 traz a compilação dos resultados experimentais referentes à operação do SGFV avaliado.

2 Descrição do Sistema

Nesta seção são apresentados os detalhes construtivos do sistema fotovoltaico estudado bem como da forma de operação e estratégia de controle utilizada no protótipo conectado à rede elétrica.

2.1 Estrutura Experimental

O SGFV trifásico utilizado neste trabalho é ilustrado na Figura 1. O conjunto dos módulos FVs, que consiste numa associação paralela de quatro strings compostas por oito módulos em série, totalizam uma potência de 8 kWp. A conversão do SGFV é realizada em dois estágios, dos quais o primeiro consiste em um conversor *boost*, responsável por elevar a tensão dos painéis FVs e garantir a extração da máxima energia disponível dos mesmos. O segundo estágio é responsável pela conversão CC-CA e é implementado por um conversor fonte de tensão (VSI) (do inglês, *Voltage Source Inverter*) de três braços contendo, cada um, duas chaves IGBTs. O link CC do VSI é composto por capacitores eletrolíticos e são conectados aos painéis FVs por meio do conversor *boost*. A conexão do sistema à rede elétrica é realizada por meio de um filtro do tipo LCL trifásico, com objetivo de atenuar o conteúdo harmônico de alta frequência que é injetado na rede elétrica pelo VSI em decorrência da frequência de comutação dos IGBTs. Para a medição das correntes elétricas no PAC são utilizadas três ponteiros de medição de corrente por efeito *hall*, do tipo *Clamp-on Keysight 1146B*. Na Tabela 1 são sumarizados os principais parâmetros do SGFV.

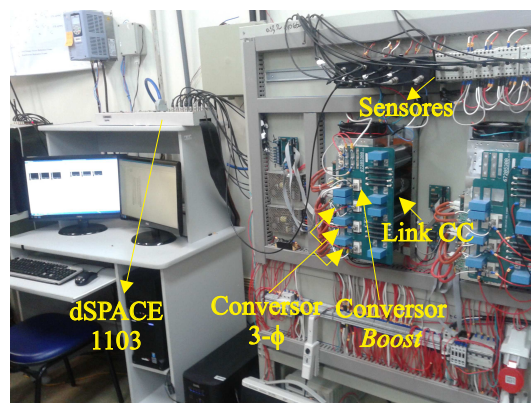


Figura 1: Estrutura Experimental.

Tabela 1: Especificações do sistema fotovoltaico.

Parâmetro	Valor
Tensão primária	380 V
Tensão secundária	220 V
Potência nominal do trafo	15 kVA
Frequência da rede elétrica	$2\pi \times 60$ rad/s
Impedância do LCL (Z_{lcl})	$0.49 \angle 60.9^\circ \Omega$

2.2 Sistema de Controle

Na Figura 2 é apresentado o diagrama de blocos do sistema de controle aplicado no SGFV trifásico da Figura 1. Nessa estratégia de controle, o controlador R_v é responsável pela regulação da tensão dos capacitores do link CC gerando a corrente de referência i_{sd}^* , alinhada ao referencial vetor tensão obtido por meio de um sistema de sincronização do tipo SRF-PLL (do inglês, *Synchronous Rotating Frame Phase Locked Loop*). A magnitude da corrente de referência i_{sd}^* garante o balanço de energia do sistema (Ribeiro et al., 2015). Um esquema de rastreamento do ponto máximo de potência do tipo perturbação e observação (MPPT P&O) ajusta o ciclo de trabalho D do conversor *boost* para alcançar o ponto de máxima potência. Controladores de corrente R_i , implementados no referencial síncrono, regulam as correntes de fase de saída i_{sdq}^e do SGFV. A estratégia de controle utilizada nesse SGFV emprega o conceito de máxima injeção de potência ativa na rede elétrica. O filtro LCL foi projetado de acordo com (Koutroulis and Blaabjerg, 2012).

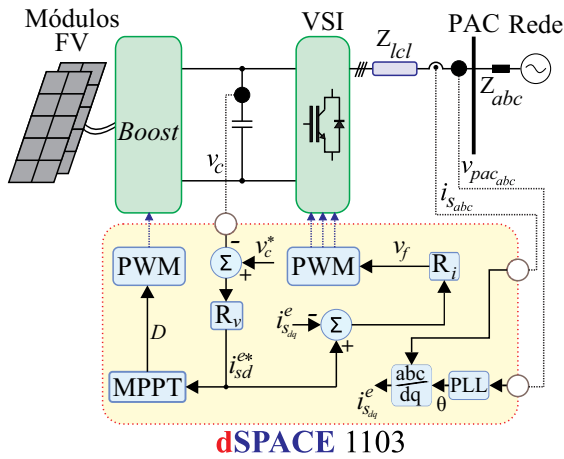


Figura 2: Diagrama de blocos do SGFV trifásico.

3 Avaliação do Impacto da Conexão do SGFV

Nesta seção são apresentados os conceitos teóricos utilizados para a implementação da ferramenta utilizada para a avaliação dos cenários do SGFV descrito na seção anterior. Além disso, são descritas as expressões para a obtenção dos indicadores de distorção harmônica.

3.1 Algoritmo Recursivo de Estimação de Fasores

O fasor é uma representação temporal de um sinal senoidal puro por meio de um número complexo X da seguinte forma:

$$X = (X_m/\sqrt{2})(\cos\phi + j\sin\phi), \quad (1)$$

em que $(X_m/\sqrt{2})$ representa o valor eficaz da senóide e ϕ é o ângulo de fase em radianos. No entanto, sinais reais são compostos por formas de ondas com diferentes frequências, dificultando a representação fasorial dos mesmos. Além disso, para sinais amostrados no tempo, a transformada discreta de Fourier é geralmente utilizada para o conhecimento das frequências presentes no sinal amostrado (Orallo et al., 2012). Outra alternativa de representação é proposta por (Phadke and Thorp, 2008), conforme a seguinte expressão:

$$X[h] = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \left\{ \cos\left(\frac{2\pi hn}{N}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi hn}{N}\right) \right\}, \quad (2)$$

em que $x[n]$ representa a n -ésima amostra do sinal no domínio do tempo discreto, $X[h]$ a h -ésima componente harmônica e $2\pi/N$ é o ângulo de amostragem, medido em termos do período da componente de frequência fundamental. Como o nível harmônico e a frequência fundamental no sistema FV geralmente variam ao longo do tempo, é necessário utilizar algoritmos que atualizam a estimativa do fasor que representa o sinal a medida que novas amostras de dados são obtidas.

Com o objetivo de se obter uma estimativa fasorial em tempo real, o método recursivo descrito por (Phadke and Thorp, 2008) é adotado neste trabalho. A forma recursiva da estimativa fasorial de um sinal consiste em aproveitar o cálculo da última estimativa fasorial e adicionar o efeito de cada nova amostra ao mesmo tempo em que é descartada a influência da primeira amostra do bloco de amostras consideradas. Os fasores do sinal de interesse são calculados recursivamente da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \widehat{X}_h[N+r] &= \widehat{X}_h[N+r-1] \\ &+ \frac{\sqrt{2}}{N}(x[N+r] - x[r])e^{-jhr\theta}, \end{aligned} \quad (3)$$

em que $\widehat{X}_h[N+r]$ representa a estimativa do fasor para cada amostra recebida após N amostras e $\theta = 2\pi/N$. Todos os valores são normalizados por um fator equivalente a $\sqrt{2}/N$ com o objetivo de obter a informação RMS do sinal em análise. O subíndice h salienta a utilização dessa equação para cada harmônico múltiplo da frequência fundamental.

3.2 Indicador de Distorção Harmônica

A norma IEEE 1459 (IEEE, 2010) define um padrão para a medição de grandezas elétricas em con-

dições senoidais e não-senoidais, balanceadas e não-balanceadas. Os indicadores que quantificam a distorção harmônica total de tensão THD_v e de corrente THD_i podem ser obtidos da seguinte maneira:

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{h=3,5,7,\dots}^{h_{max}} V_h^2}{V_0^2}}, \quad (4)$$

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=3,5,7,\dots}^{h_{max}} I_h^2}{I_0^2}}, \quad (5)$$

em que V_h e I_h representam os valores RMS das tensões e correntes harmônicas de ordem h , respectivamente, e V_0 e I_0 representam os valores da tensão e corrente das componentes fundamentais.

4 Validação da Estimação Fasorial para Sinais Simulados

Para validar o cálculo recursivo da estimação fasorial, foram utilizados sinais sintéticos de tensão e corrente contendo harmônicos de ordem 3 e 5 no ambiente de simulação MATLAB, de acordo com as Equações 6 e 7. Os sinais foram amostrados com uma frequência de 7680 Hz com objetivo de trabalhar com 128 amostras por ciclo da frequência fundamental.

$$v[n] = \sqrt{2}[100\text{sen}(2\pi 60n/f_s) + 20\text{sen}(2\pi 180n/f_s) + 5\text{sen}(2\pi 300n/f_s)], \quad (6)$$

$$i[n] = \sqrt{2}[10\text{sen}(2\pi 60n/f_s) + 1\text{sen}(2\pi 180n/f_s) + 0,5\text{sen}(2\pi 300n/f_s)]. \quad (7)$$

Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos por meio da simulação dos sinais sintetizados. De acordo com as Figuras 3(a) e (b), as formas de onda para a tensão e corrente ao longo do tempo se distinguem de uma senóide pura por apresentarem um conteúdo harmônico não nulo. Nas Figuras 3(c) e (d) são apresentados os valores eficazes dos fasores estimados recursivamente, em que os subíndices 0, 3 e 5 representam a componente fundamental, harmônica de ordem 3 e de ordem 5, respectivamente. Os valores eficazes apresentam um nível de precisão satisfatório sem oscilações devido a natureza estacionária dos sinais sintéticos. Na Figura 3(e), por sua vez, são ilustrados os valores estimados para quantificar a distorção harmônica de tensão THD_v e de corrente THD_i . Os valores da THD_v e THD_i foram estimadas em 20,62% e 12,5%.

5 Resultados Experimentais

Os impactos causados pela conexão da estrutura de geração trifásica à rede elétrica serão analisados com

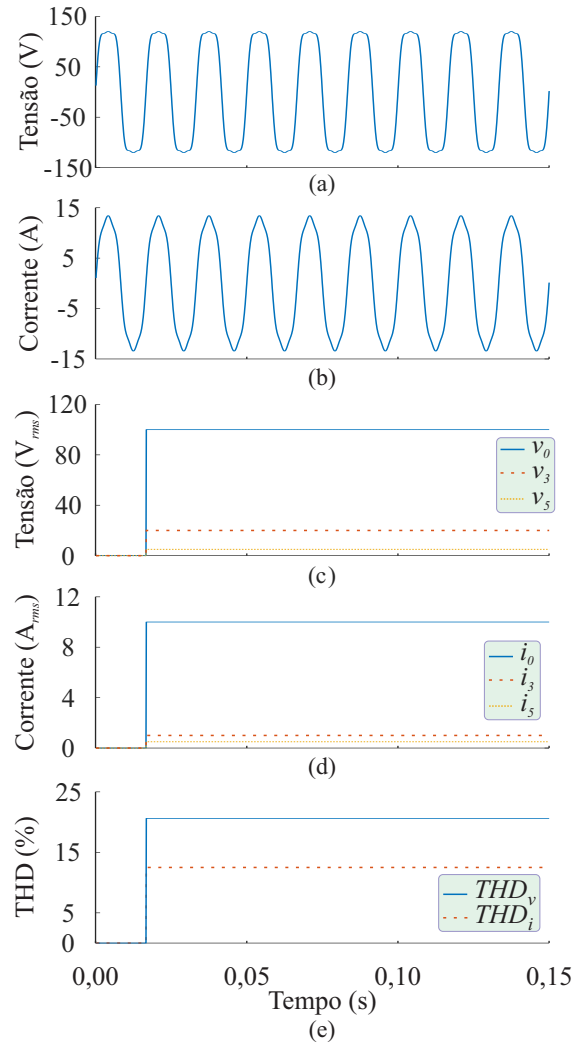


Figura 3: Validação do método para sinais de tensão e corrente simulados.

base no indicador de distorção harmônica. O nível penetração máxima (NP_{max}) teórico é de 53,3%, levando em consideração a potência instalada do sistema fotovoltaico trifásico e a capacidade instalada da subestação (8kWp/15kVA). As medições foram realizadas durante um dia útil de operação do SGFV trifásico e, a partir dos experimentos realizados, foram mapeados valores de níveis de penetração variando de 4,3% a 42%. Os sinais enviados pelos sensores de corrente do sistema são coletados pelo sistema de aquisição de dados dSPACE 1103 a uma taxa de amostragem de 7680 Hz.

5.1 Impacto na Rede Elétrica

A estimação dos valores eficazes e de distorção harmônica de corrente para dois níveis de penetração (aproximadamente 36% e 10%) é apresentada na Figura 4. A característica não-estacionária dos sinais medidos é evidenciada pelas oscilações presentes nos valores estimados. Para a alta penetração (Figura 4 (a)-(d)), há uma variação considerável no valor da componente fundamental I_0 devido à ação do algo-

ritmo MPPT. Durante o decréscimo observados no valor eficaz da componente fundamental, ocorre um aumento em torno de 20 mA nos valores eficazes das componentes harmônicas I_3 e I_5 . Durante a medição, a THD permanece abaixo dos limites definidos pela norma IEEE 1547. Durante a baixa penetração (Figura 4 (e)-(h)), quando o SGFV fornece em torno de 4 A por fase, os valores eficazes de I_3 e I_5 sofrem uma redução média de 20 mA e 8 mA, respectivamente, quando comparados com os valores estimados na alta penetração. Entretanto, a THD aumenta consideravelmente e ultrapassa o máximo THD permitido por norma.

O indicador da distorção harmônica de corrente THD , em relação aos níveis de penetração avaliados, são apresentados na Figura 5. De acordo com os resultados experimentais, é possível observar uma relação inversa entre o THD e o nível de penetração. Para baixos níveis de penetração, o THD médio apresenta valores próximos a 17%, enquanto que para altas penetrações, valores em torno de 4,8%. A alta THD , para baixos níveis de penetração, decorre do fato de que durante esses cenários de operação, a potência entregue à rede é próxima de zero, com baixa amplitude da componente fundamental da corrente em relação às componentes harmônicas. A fase B apresenta os maiores valores de THD para baixas penetrações, com valores próximos a 25%. Esse evento pode ser explicado pela assimetria das impedâncias internas do transformador, em que as fases mais fracas dos alimentadores tendem a ser mais susceptíveis a distorções harmônicas de corrente. Para os níveis de penetração avaliados, a THD não atendeu ao critério recomendado pela normativa IEEE 1547 (IEEE, 2009a), que é um THD inferior a 5%.

Para uma análise mais detalhada da THD de corrente, a magnitude de cada componente harmônica até 540 Hz é avaliada, conforme ilustrado na Figura 6. Cada barra representa a média dos valores eficazes calculados para níveis de penetração nos intervalos de 4,3% a 15% (Faixa 1), de 15% a 30% (Faixa 2) e de 30% a 42% (Faixa 3). O valor eficaz da amplitude dos harmônicos de ordem 7 apresenta uma tendência de diminuição em relação direta com o nível de energia entregue à rede elétrica. Por outro lado, o valor eficaz da amplitude dos harmônicos de ordens 3, 5 e 9 apresentam uma elevação em relação ao nível de penetração fotovoltaica. O aumento no valor eficaz do terceiro harmônico, que atingiu uma média aproximada de 50%, ocorre em paralelo a uma diminuição de magnitude similar, em torno de 60%, no valor eficaz do sétimo harmônico. Com isso, o conteúdo harmônico resultante apresenta variações muito pequenas quando relacionadas ao nível de penetração fotovoltaica.

6 Conclusão

Este trabalho apresentou estudos sobre a utilização de um algoritmo recursivo de estimação fasorial na avaliação da QEE para sistemas fotovoltaicos conecta-

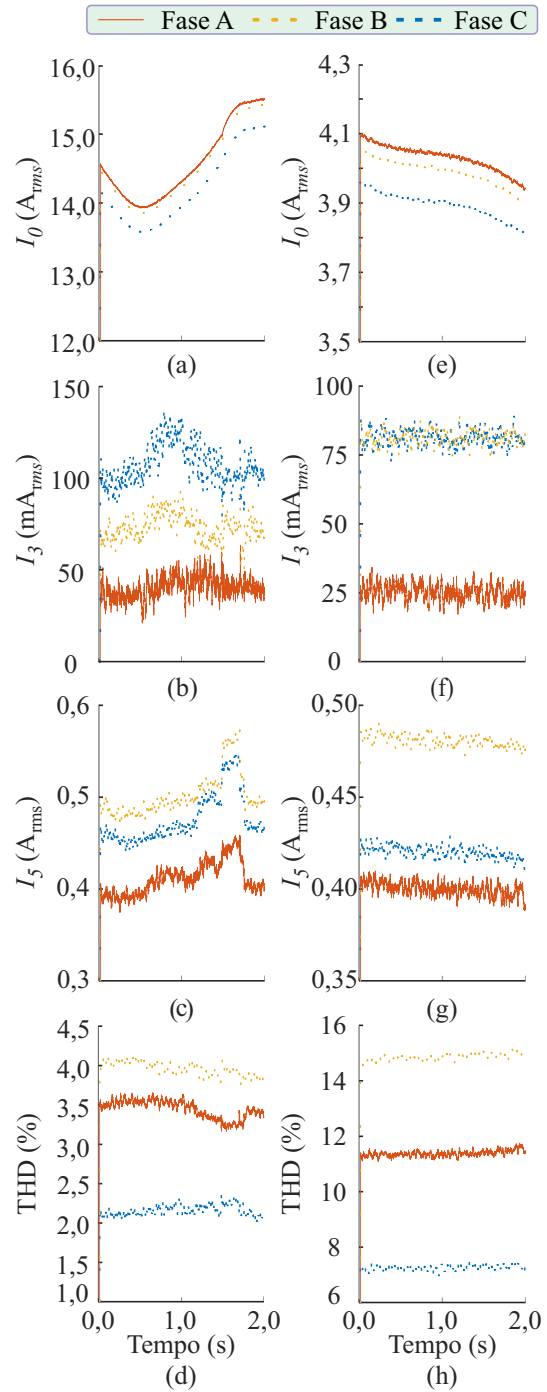


Figura 4: Estimação em tempo real dos valores eficazes e de distorção harmônica de corrente para dois níveis de penetração distintos.

dos à rede elétrica de baixa tensão. Os estudos tiveram início pela formalização matemática da ferramenta computacional utilizada nas análises. Em seguida, foi realizada a validação dos algoritmos para a estimação dos indicadores de THD para sinais sintéticos. Além disso, neste artigo foi avaliado o impacto harmônico causado na rede elétrica devido à conexão de um sistema fotovoltaico trifásico. Foi possível observar uma relação inversa entre o THD de corrente e o nível de penetração do sistema. No entanto, altos valores de THD foram observados na

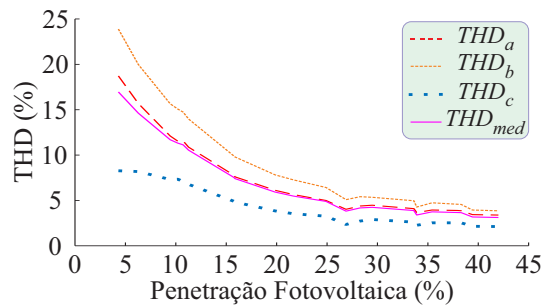


Figura 5: Comportamento harmônico em função do nível de penetração fotovoltaica.

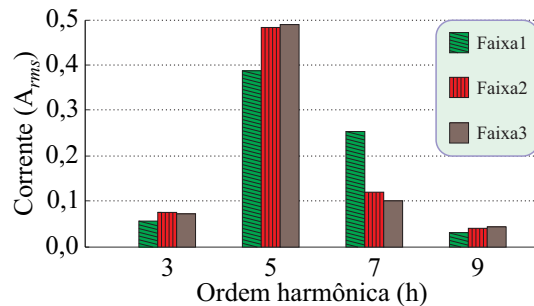


Figura 6: Magnitude das componentes harmônicas de até 540 Hz com base em três faixas de penetração.

baixa penetração, sendo esses valores superiores ao recomendado pelo IEEE. Foi constatado que o conteúdo harmônico não depende diretamente do nível de penetração do sistema fotovoltaico, apresentando uma variação mínima, quando relacionada à variação da componente fundamental da corrente elétrica que é entregue ao secundário do alimentador. Esse evento explica, matematicamente, o alto THD para baixas penetrações. Desse modo, fica claro que a utilização do indicador THD não é adequado para quantificar a poluição harmônica que um sistema fotovoltaico está produzindo no PAC em que é conectado, pois um alto THD não é fator prejudicial à rede elétrica de baixa tensão, tendo em vista que os harmônicos presentes no PAC são de baixa magnitude.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem a PETROBRAS, empresa de petróleo e energia pelo suporte financeiro por meio de projeto de P&D (processo 2012/00042-2).

Referências

- ANEEL (2015a). Módulo 3 - acesso ao sistema de distribuição. <http://www2.aneel.gov.br/>.
- ANEEL (2015b). Módulo 8 - qualidade da energia elétrica. <http://www2.aneel.gov.br/>.
- Awadallah, M. A., Venkatesh, B. and Singh, B. N. (2015). Impact of solar panels on power quality of distribution networks and transformers, *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 38, pp. 45–51.
- Begovic, M., Pregelj, A., Rohatgi, A. and Novosel, D. (2001). Impact of renewable distributed generation on power systems, *System Science, Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference*, pp. 654–663.
- Chidurala, A., Saha, T. K., Mithulananthan, N. and Bansal, R. C. (2014). Harmonic emissions in grid connected pv systems: A case study on a large scale rooftop pv site, *IEEE PES General Meeting Conference Exposition*.
- IEEE (2009). Ieee application guide for ieee std 1547(tm), ieee standard for interconnecting distributed resources with electric power systems, *IEEE Std 1547.2-2008* pp. 1–217.
- IEEE (2010). Ieee standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions, *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)* pp. 1–50.
- Katiraei, F. and Aguero, J. R. (2011). Solar pv integration challenges, *IEEE Power and Energy Magazine* 9(3): 62–71.
- Koutroulis, E. and Blaabjerg, F. (2012). Methodology for the optimal design of transformerless grid-connected pv inverters, *IET Power Electronics* 5(8): 1491–1499.
- Nakabayashi, R. K. (2014). Microgeração fotovoltaica no brasil: Condições atuais e perspectivas futuras. Dissertação de Mestrado.
- Orallo, C., Carugati, I., Donato, P. and Maestri, S. (2012). Harmonics measurement with a modulated sliding dft algorithm on an fpga platform, *Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications*.
- Phadke, A. G. and Thorp, J. S. (2008). *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, New York: Springer.
- Ribeiro, R. L. A., Rocha, T. d. O. A., Sousa, R. M., Santos, E. C. and Lima, A. M. N. (2015). A robust dc-link voltage control strategy to enhance the performance of shunt active power filters without harmonic detection schemes, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62(2): 803–813.
- Rocha, T. O. A. (2015). Contribuições para a estratégia de controle aplicada à geração fotovoltaica interconectada à rede elétrica. Tese de Doutorado.

Shah, S. K., Hellany, A. and Nagrial, M. e Rizk, J.
(2015). Review of power quality monitoring

web-based techniques, *Power Engineering Conference (AUPEC), Australasian Universities*.