

ESTUDO E CORREÇÃO DE DISTORÇÕES HARMONICAS EM SISTEMAS FOTVOLTAICOS

A.F. Martins Ev¹, L.J. Kremer¹, D.R. Moreira¹, E.A.A. Osorio²

¹Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha

Rua Inconfidentes, 395 - Novo Hamburgo – RS - CEP 93340-140 - Brasil

²Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Escola Politécnica

Av. Ipiranga, 6681 – Prédio 96A - Tecnopuc - Porto Alegre-RS, CEP 90619-900

Tel. 055-51-35875072 - e-mail: amanda.francielle.ev@hotmail.com

Recibido 19/08/18, aceptado 28/09/18

RESUMO: Segundo o PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, um dos pontos preocupantes na qualidade da energia fotovoltaica é a presença de distorções harmônicas, geradas por cargas não lineares ou eletrônicas, como inversores CC/CA. Essas podem resultar em falha ou má operação dos equipamentos, bem como aquecimento e até queima de aparelhos eletrônicos. Este trabalho consiste no estudo aprofundado das distorções harmônicas e maneiras viáveis de corrigi-las. A alternativa encontrada foi a projeção de um dispositivo eletrônico, constituído de um filtro passivo passa-baixa, que permite a passagem de sinais de tensão e corrente somente em frequências abaixo da frequência fundamental da rede, atenuando sinais com frequências maiores. Devido às pesquisas, cálculos, medições, projeção do filtro e testes, fica comprovado que é possível atenuar distorções harmônicas em sistemas fotovoltaicos em aproximadamente 95% utilizando um dispositivo de baixo custo para a prevenção de danos ao circuito.

Palavras-chave: energia fotovoltaica, distorções harmônicas, filtro passivo, frequência

INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é uma das alternativas energéticas mais promissoras atualmente. No Brasil, até o período de abril de 2018, foram realizadas por volta de 24.514 conexões de geração fotovoltaica e se comparado com mesmo período de 2017 onde existiam em torno de 10.000 conexões, percebemos que isto representa um aumento de aproximadamente 145% em instalações de micro ou mini geração distribuída em apenas um ano (Mighelão et al., 2018).

A Resolução Normativa Nº 482/2012, criada pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, com o objetivo de estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica, permite que consumidores gerem e forneçam energia excedente à concessionária, em troca de créditos (ANEEL, 2012). Com isto, associado à diminuição no valor de venda dos equipamentos que compõe um sistema fotovoltaico, em especial módulos fotovoltaicos que teve seu preço reduzido nos últimos anos, acaba por tornar a energia solar fotovoltaica uma opção cada vez mais atraente entre consumidores. Porém, este meio de energia renovável ainda é pouco evoluído no país, tendo em vista que a tecnologia avança rápido a cada ano, existem diversos pontos a se estudar e trabalhar.

Com o crescimento da utilização de energia solar fotovoltaica, cresce também a preocupação com a qualidade da energia produzida. Conforme o PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, em seu Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, um dos pontos preocupantes na qualidade da energia solar fotovoltaica é a presença de distorções harmônicas (ANEEL, 2018). As distorções harmônicas mais impactantes são referentes aos momentos onde a produção de energia entregue pelo inversor ao sistema está muito abaixo da sua capacidade nominal, geralmente nos momentos de baixa radiação, que ocorre com maior intensidade no início da manhã e

no final da tarde, bem como na presença de sombreamentos sobre todo ou parte do arranjo fotovoltaico (Fortes, 2016).

A produção dessas distorções pode causar problemas para o sistema elétrico e para a rede de energia elétrica ao qual está conectado (Lopez, 2013). Pensando nisso, o estudo e a correção de tais harmônicas, a partir da simulação e projeção de um dispositivo eletrônico que contenha filtros, é de muita relevância.

O grande malefício da presença de distorções harmônicas na rede de alimentação de energia elétrica é a possibilidade de queima ou diminuição do tempo de vida útil de determinados aparelhos eletrônicos. Devido ao avanço da eletrônica, e com o surgimento dos tiristores e do chaveamento a transistor, houve um crescimento na utilização de dispositivos eletrônicos, e em meados de 1950, as cargas que em sua maioria eram lineares, passaram então a ter cargas de características não lineares introduzidas nas instalações. Essas cargas apresentam na saída uma corrente onde sua forma de onda é bastante distorcida se comparada a senoide ideal (Martinho, 2009).

(Lopez, 2013) afirma que uma das melhores formas de corrigir as distorções harmônicas geradas é através da utilização de filtros ativos e passivos de harmônicas para controlar a frequência específica causada por elas. Assim, realizou-se cálculos e simulações de circuitos eletrônicos contendo filtros que apresentassem a capacidade de corrigir a forma de onda deformada produzida pela presença de harmônicas.

O objetivo desse trabalho é apresentar o estudo e projeto de um filtro para correção de distorções harmônicas de sistemas de microgeração solar fotovoltaica visando melhorar a qualidade da energia inserida na rede de distribuição de energia elétrica.

METODOLOGIA

Cálculo para dimensionamento do filtro passivo passa-baixa

Seguindo os estudos práticos sobre os filtros para correção de harmônicas, foi projetado um filtro passivo passa-baixa, dimensionado para operar com frequências iguais ou menores que 60 Hz. Além disso, foi considerada a potência máxima de saída do inversor para a realização do cálculo da impedância de saída. Com tais considerações, foi possível obter o circuito esboçado na Figura 1.

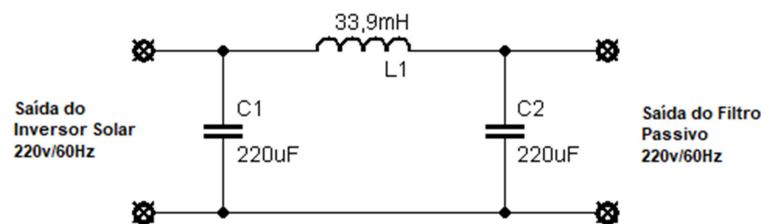


Figura 1: Configuração de filtro passivo passa baixa.

Para o dimensionamento do circuito foram feitos cálculos, considerando valores médios de inversores mais utilizados nos sistemas fotovoltaicos. Após a alteração do valor dos capacitores do circuito para valores comerciais, alterou-se também o valor do indutor. Com os valores máximos, desta forma calculou-se uma impedância de saída de 12,79 Ω com as seguintes equações:

$$L = \left(\frac{Z_o}{\pi f c} \right) \quad (1)$$

Onde:

L: Indutância, valor comercial.

Z_o : Impedância de saída.

f_c : Frequência de operação da rede.

$$C = \left(\frac{1}{\pi Z_o f c} \right) \quad (2)$$

Onde:

C: Capacitância, valor comercial.

Z_o : Impedância de saída.

f_c : Frequência de operação da rede.

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

Onde:

Z: Impedância.

L: Indutância.

C: Capacitância.

Simulações em software e laboratório dos filtros dimensionados

Seguindo com o estudo prático do efeito das distorções harmônicas em conjuntos fotovoltaicos e partindo para a busca por soluções das referentes impurezas elétricas, foram realizadas simulações em softwares e em laboratório. Os *softwares* utilizados foram o Proteus 8 (PROTEUS, 2018) e o Multisim 11.0 (MULTISIM, 2018), onde foram realizadas as simulações dos filtros projetados e do inversor presente no sistema fotovoltaico. Os testes em laboratório proporcionaram a confirmação de que a presença de distorções harmônicas em sinais de 60 Hz (frequência da rede elétrica utilizada no Brasil) influencia a forma de onda do sinal, podendo-se observar alterações na senoide ao serem adicionadas frequências referentes às componentes harmônicas. Com isso, foi observado que pode haver testes em laboratório, com circuitos que apresentem quedas de tensão e dissipação de potência inferiores aos de sistemas fotovoltaicos, mas que tenham características similares, com o intuito de verificar a eficácia de filtros projetados para a correção das distorções harmônicas, colocando-se como uma opção viável de análise de eficácia do dispositivo projetado.

Os testes em laboratório se deram com a utilização de três geradores de função configurados para apresentar amplitude de tensão pico a pico igual a 6 V e frequências de 180 Hz, 300 Hz e 420 Hz, sendo estas com o intuito de simular distorções harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem, respectivamente. Para representar o sinal da rede, foi utilizado um transformador de tensão AC de 220 V para 6 V, mantendo a frequência do sinal da rede em 60 Hz. O sinal resultante foi conferido em um osciloscópio digital, onde foi perceptível uma pequena diferença na forma de onda final. Por mais que pequena, a deformação é significativa e comprova que a energia transformada nos momentos aos quais apresenta harmônicas e utilizada para alimentação de aparelhos e/ou equipamentos seja impura, não chegando em seu destino conforme o desejado. Nas Figuras 2 e 3 podemos ver o processo de testes realizado em laboratório, onde desenvolvido a simulação do inversor e verificação dos filtros projetados.

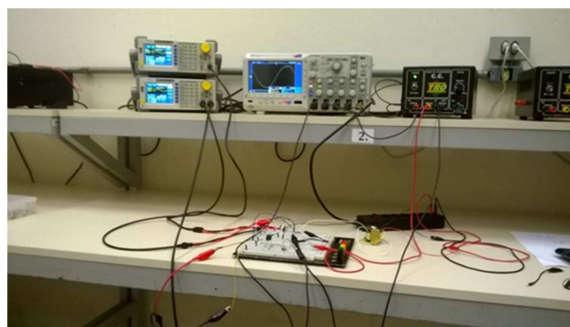


Figura 2: Testes com filtros em laboratório.

Com base no estudo sobre filtros ativos e passivos, foram dimensionados diferentes filtros com distintas configurações. O teste de funcionamento dos circuitos ocorreu em laboratório e em software. Nos testes físicos, em bancada, foram utilizados valores em escala reduzida, com a intenção de apenas observar as características de operação dos filtros projetados e do sinal entregue por cada um. Já nos testes em software foi possível trabalhar diretamente com o dimensionamento real dos filtros, levando em consideração os dados obtidos através das pesquisas e das medições realizadas anteriormente no processo de execução do projeto em bancada.

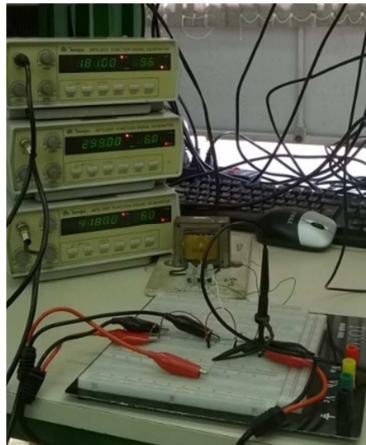


Figura 3: Simulação do inversor solar em laboratório.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados dos testes com filtro passivo passa-baixa

Com o filtro passivo passa baixa ativo, percebeu-se que a configuração de filtragem é adequada para a eliminação de frequências como 180 Hz, 300 Hz e 420 Hz, mantendo a frequência fundamental de 60 Hz. Porém, apesar da atenuação dos sinais indesejados ser realizada, o sinal principal também apresentou queda de valores em menor proporção, o que não poderia ocorrer no caso de um sistema fotovoltaico. Os testes em laboratório foram de grande utilidade para o estudo das distorções harmônicas, onde observou-se o efeito das impurezas na rede elétrica, não só da simulação do inversor, como também da energia fornecida pela própria concessionária de energia local presente no sistema elétrico da Fundação Liberato, local dos testes.

Partindo para o estudo de filtros passivos e a realização dos testes de funcionamento, foram obtidos resultados satisfatórios. Foi possível verificar que, sem a presença de distorções harmônicas, apenas com a tensão de 220 V e a frequência de 60 Hz, a saída do filtro apresentou aproximadamente os mesmos 220 V e uma corrente de 17,2 A, representando o limite fornecido pelo inversor solar, a Figura 4 demonstra a análise.

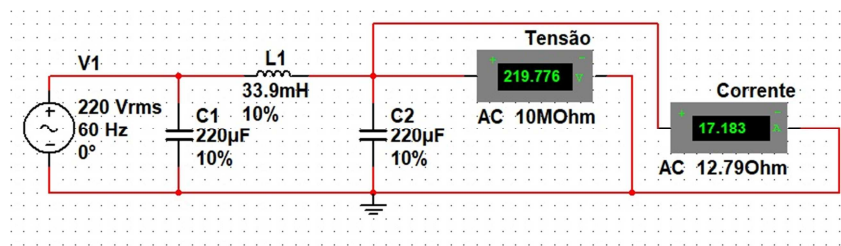


Figura 4: Análise de output do filtro.

Após a verificação inicial de funcionamento, os valores de frequência do sinal de entrada no filtro, que representa a saída do inversor solar, foi ajustado para os valores referentes as ordens de distorção harmônica presentes no conjunto.

Sabendo-se que a variação do percentual de distorção harmônica total presente em sistemas de energia fotovoltaica é dinâmica e que o objetivo da análise é levantar dados que mostrem que o dispositivo pode ser utilizado para a correção das harmônicas em qualquer circunstância, ainda que com ênfase na melhoria da energia em momentos de início e fim de dia, foi realizado o teste de diferentes percentuais de tensão para cada ordem de distorção harmônica e o valor de 220 V para cada uma delas. Com isto, comprovou-se que a alteração é proporcional, portanto, aplicar o mesmo valor de tensão para cada caso é a solução mais conveniente.

A visualização do sinal individual de cada harmônica antes e depois da passagem pelo filtro foi realizada para a completa análise do seu funcionamento. Para as Figuras 5, 6 e 7, o sinal em laranja representa a saída do inversor solar, enquanto o sinal em vermelho representa o sinal atenuado após a saída do filtro.

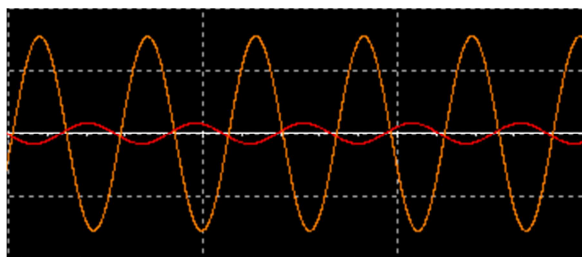


Figura 5: Análise de funcionamento do filtro para as harmônicas de 3ª ordem.

Na análise de valores referentes a saída do filtro para as harmônicas de 3ª ordem, é possível perceber uma tensão de 24,3 V, o que representa 11,04 % do sinal de 220 V. Seu valor de corrente ficou em 1,9 A, que representa os mesmos 11,04 % do valor original.

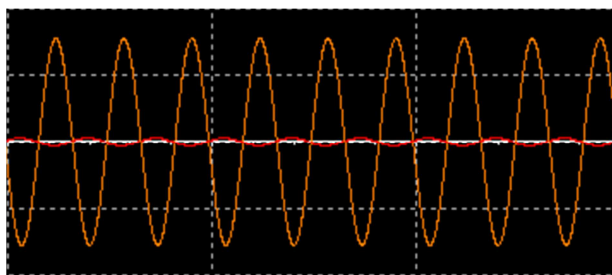


Figura 6: Análise de funcionamento do filtro para as harmônicas de 5ª ordem.

Tanto nos valores obtidos como no gráfico de comparação gerado pelo simulador de osciloscópio no software Multisim, é possível notar que as distorções harmônicas de 5ª ordem possuem maior atenuação no sinal do que as de 3ª ordem. Isso se explica com a teoria do funcionamento do filtro passa-baixa, visto que, com a configuração de sua frequência de corte para 60 Hz, quanto maior for a frequência aplicada, maior será a atenuação do sinal.

Após os testes para a 7ª ordem, que tem seu gráfico de comparação apresentado na Figura 7, foi possível realizar a montagem de uma tabela contendo todos os valores encontrados e com os respectivos percentuais de atenuação, que podem ser atribuídos a correção das distorções harmônicas na transformação da energia renovável.

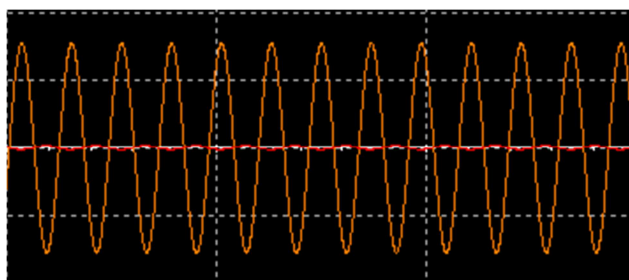


Figura 7: Análise de funcionamento do filtro para as harmônicas de 7ª ordem.

ORDEM	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	V%	I%
3ª	24,3	1,9	11,04	11,05
5ª	8,47	0,662	3,85	3,85
7ª	4,28	0,335	1,94	1,95

Tabela 1: Resultados dos testes com filtro.

Para concluir a análise de funcionamento do filtro, foi adicionado ao simulador um somador de sinais, que possibilita observar o sinal de saída do inversor solar com a presença de distorções harmônicas e a realização da comparação com o sinal filtrado.

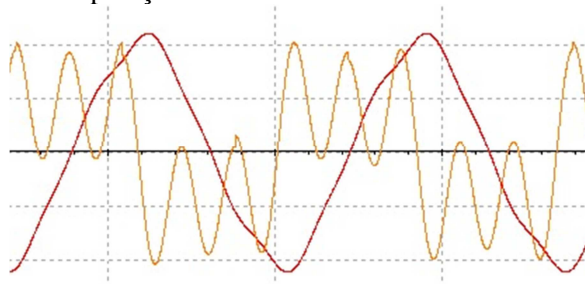


Figura 8: Comparação do sinal de saída do inversor solar e do filtro na simulação em software.

Para a simulação da Figura 8 foi levado em consideração a amplitude dos sinais das distorções harmônicas. Considerando os níveis de THDv - taxa de distorção harmônica de tensão para cada ordem de distorção harmônica, foram aplicados valores próximos aos encontrados em estudos. Pelo fato do somador de sinais ser compatível apenas para três somas, o gráfico apresentado mostra apenas harmônicas de 3ª e 5ª ordem, além da frequência fundamental.

É possível perceber que existe uma defasagem no sinal, o que pode ser explicado devido a característica capacitiva do filtro. Pelo fato do filtro corrigir a tensão e a corrente de um sinal em mesma proporção, a defasagem proveniente das características do circuito não alteram o fator de potência do sinal.

CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma projeção de um dispositivo eletrônico, constituído de um filtro passivo passa-baixa, que permite a passagem de sinais de tensão e corrente somente em frequências abaixo da frequência fundamental da rede, atenuando sinais com frequências maiores. Devido aos cálculos, medições e testes, ficou comprovado que é possível atenuar distorções harmônicas em sistemas fotovoltaicos em aproximadamente 95% utilizando um dispositivo de baixo custo para a prevenção de danos ao circuito.

Com os resultados apresentados foi possível analisar que o filtro é eficiente para corrigir as distorções harmônicas. Mesmo que analisadas apenas três ordens de distorções harmônicas, as mais comumente encontradas nestes casos, o filtro projetado tem capacidade para atenuar sinais de outras ordens mais elevadas, caso necessário.

A hipótese inicial levantada se mostrou válida ao se solucionar o problema com um dispositivo composto por um filtro eletrônico. De tal modo, o problema do projeto mostrou-se solucionável após a execução da pesquisa. Embora tenham-se cumprido os objetivos propostos, é possível perceber aspectos que podem gerar novas perspectivas para esta investigação, que são: analisar a viabilidade de utilização do dispositivo projetado em diferentes casos de sistemas fotovoltaicos e buscar desenvolver uma modularidade para o dispositivo, tornando-o capaz de ser aplicado para todos os casos.

REFERENCIAS

- ANEEL (2018). PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica - Rev.10. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em 18/08/2018.
- ANEEL (2012). Resolução Normativa N° 482, De 17 de Abril de 2012. Disponível em: www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf. Acesso em 18/08/2018.
- Fortes, R.R.A. (2016). Distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída fotovoltaica em condição de ressonância paralela. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista - UNESP. 120p

- Lopez, R.A. (2013). Qualidade na Energia Elétrica, 2 ed. Artliber, São Paulo. 528p
- Martinho, E. (2009). Distúrbios da Energia Elétrica., 1 ed. Erica Ltda. 144p
- Mighelão, T.R., Hahn, P., Scheidt, P., Chaves, N., Ruther, R. (2018). O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica. Edição 5. 74p
- MULTISIM (2018). Multisim is designed for schematic entry, simulation, and feeding to downstage steps, such as PCB layout. Disponível em: <http://www.ni.com/>. Acesso em: 20/08/2018.
- PROTEUS (2018). Proteus Design Suite is a complete software solution for circuit simulation and PCB design. Disponível em: <https://www.labcenter.com>. Acesso em: 20/08/2018.

ABSTRACT

According to the Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), the disturbing points in the quality of photovoltaic energy are a presence of harmonic distortions generated by non-linear or electronic loads, such as DC / AC inverters. These may result in equipment failure or operation, such as heating and burning electronic appliances. The work consists of a study on harmonic distortions and viable ways of correcting them. The alternative found was the projection of an electronic signal, consisting of a passive low-pass filter, which allows the passage of voltage signals and the single frequency of the network frequency, attenuating the signals more frequently. Surveys, calculations, measurements, filter projection and testing, proven to be able to attenuate injuries in photovoltaic systems are 95% using a cost reduction device to prevent circuit damage.

Keywords: photovoltaic energy, harmonic distortions, passive filter, frequency.