

APLICAÇÃO DE FILTRO ATIVO BASEADO NA TEORIA P-Q PARA REDUÇÃO DE HARMÔNICOS EM UM GERADOR SÍNCRONO DE IMÃ PERMANENTE UTILIZADO EM MICROGERAÇÃO EÓLICA

PEDRO J. S. NETO, ADEON C. PINTO, FILIPE C. PEREIRA

*Colegiado de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF
Av. Antônio Carlos Magalhães 510, Santo Antônio, CEP: 48902-300
Juazeiro, Bahia, Brasil*

pedro_jsn@DSCE.fee.unicamp.br, adeon.pinto@univasf.edu.br,
filipe.campos@ieee.org

Abstract— This article presents a proposal of an active filter to reduce harmonics at a permanent magnetic synchronous generator applied to wind micro generation. The adopted filter model is constituted by a frequency inverter controlled by SPWM and the p-q instantaneous power theory based controller philosophy. To validate the topology, PSIM computational simulations were performed within the system parameters maximum fidelity. Thus, an explanation related to active filter control logic is shown, as well the topology adopted and the computational results.

Keywords— Active Filter, Permanent magnetic synchronous generator, Wind micro-generation, Harmonic reduction, p-q theory.

Resumo— Este trabalho apresenta uma proposta de aplicação de um filtro ativo para reduzir harmônicos em um gerador síncrono de ímã permanente aplicado à microgeração eólica. O modelo do filtro adotado é constituído de um inversor de frequência acionado por SPWM e que apresenta sua lógica de controle baseada na teoria de potências instantâneas p-q. Para validação da topologia, foram realizadas simulações computacionais no *software* PSIM, adotando-se o máximo de fidelidade dos parâmetros do sistema. Apresentam-se, assim, uma explanação da teoria relacionada à lógica de controle do filtro ativo, bem como a topologia do mesmo, e os resultados das simulações computacionais.

Palavras-chave— Filtro ativo, Gerador síncrono de ímã permanente, Microgeração eólica, Redução de Harmônicos, Teoria p-q.

1 Introdução

Com a modernização dos sistemas elétricos, novos avanços tecnológicos vêm sendo estudados para garantir a maior eficiência e segurança dos mesmos. Dentre esses avanços, destaca-se a utilização da Geração Distribuída (GD) (Gomez et al, 2013) associada ao uso de fontes alternativas de energia como a solar e a eólica (Singh et al, 2011), além do conceito de redes inteligentes ou *smart grids*, as quais permitem o fluxo bidirecional de potência entre o consumidor e a concessionária (Deblasio & Tom, 2008). Uma configuração possível para emprego da energia eólica em microgeração distribuída utilizando Aerogeradores de Pequeno Porte (AGPP) é mostrada na Fig.1 (Pinto & dos Santos Neto, 2015). Essa tecnologia já apresenta elevado grau de eficiência e custo financeiro atrativo comercialmente (Wang et al, 2011).

O sistema mostrado na Fig. 1 foi implementado computacionalmente no *software* PSIM e é constituído pelos seguintes componentes: turbina eólica de 6 kW de potência elétrica nominal quando submetida a uma velocidade de vento nominal de 12 m/s, Gerador Síncrono de Ímã Permanente (GSIP) trifásico, retificador CA-CC não controlado, sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT), conversor CC-CC do tipo *boost*, inversor de frequência monofásico em ponte completa controlado pelo método da corrente média

(Pinto & dos Santos Neto, 2015; Arifujamman, 2010).

A análise da Distorção Harmônica Total (DHT) (IEEE, 1992) aplicada às grandezas elétricas geradas pelo sistema eólico apresentado na Fig.1 indicou um perfeito atendimento da norma internacional IEEE 1547-2003 que regulamenta a conexão de fontes de geração distribuída à rede elétrica (IEEE, 2003). Contudo, essa norma abrange apenas os limites de conteúdo harmônico no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) e não normatiza os níveis admissíveis no gerador elétrico.

Sabe-se, entretanto, que a utilização do retificador não controlado de seis pulsos resulta na injeção de uma quantidade significativa (cerca de 30%) de harmônicos característicos no gerador elétrico devido a sua operação não linear (Dewan & Shahrodi, 1985). Esses harmônicos de tensão e de corrente geram componentes assíncronos no campo magnético do entreferro dos geradores elétricos, o que ocasiona aumento da temperatura da máquina e consequentemente, aumento das perdas, culminando na redução da vida útil do mesmo (IEEE, 1992).

Neste sentido, este trabalho consiste na proposta de utilização de um filtro ativo, baseado em Akagi et al (1984) e Bhavsar & Patel (2011), para minimizar o conteúdo harmônico no GSIP conectado à rede elétrica através do conversor CA-CC-CA. As simulações computacionais foram realizadas no *software* PSIM, adotando-se as características reais da máquina e dos elementos constituintes do aparato eólico-

elétrico, com a finalidade de garantir máxima confiabilidade dos resultados.

2 Filtros ativos

Um filtro ativo é composto por um inversor de frequência e pelo respectivo sistema controle para realização das operações desejadas. A grande vanta-

gem dessa configuração é que a correção da distorção harmônica é feita de forma dinâmica, para tanto, o filtro ativo monitora constantemente o sistema e através da realimentação consegue compensar não só distorção harmônica, como também corrigir o fator de potência e desequilíbrio de corrente na carga (Akagi et al, 2007). Um esquema típico de um filtro ativo é mostrado na Fig. 2.

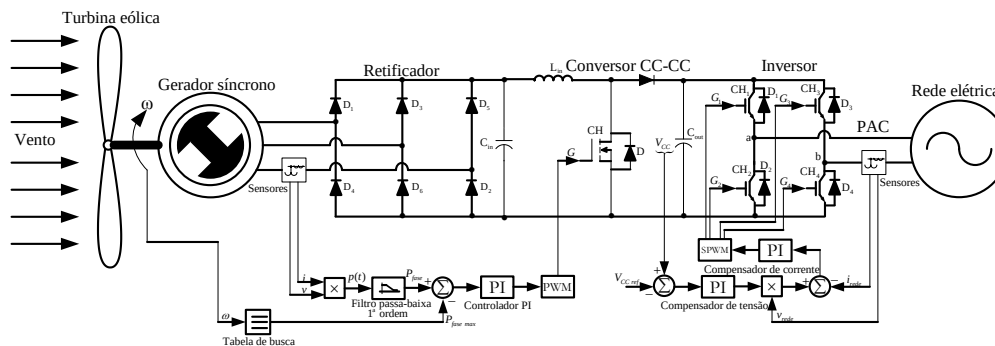


Figura 1. Sistema de geração eólica estudado

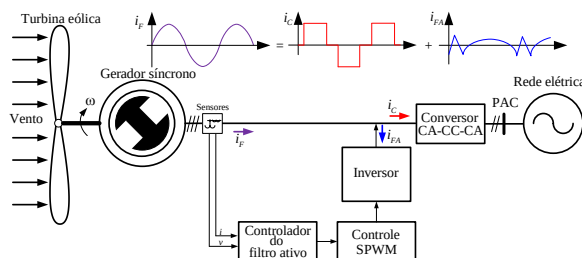


Figura 2 – Estrutura de um filtro ativo de potência

Em um sistema eólico interligado, o objetivo do filtro ativo é compensar a corrente distorcida gerada pelo GSIP em virtude do retificador trifásico não controlado. Na Fig. 2 essa corrente distorcida é representada por i_c . Após a inserção do filtro ativo, as correntes compensadas i_{FA} são injetadas no sistema, regidas por uma estratégia de controle aplicada a um inversor de frequência, de forma que o filtro e o retificador sejam vistos pela fonte como se fosse uma carga linear. O resultado ideal é a combinação das correntes i_{FA} e i_c , resultando em uma corrente gerada i_F livre de harmônicos e, portanto, puramente senoidal.

3 Teoria p-q e controle de filtros ativos

Dentre as diversas técnicas de controle utilizadas para filtro ativo, destaca-se a técnica baseada na teoria p-q, desenvolvida por Akagi et al (1984). Uma vez que a teoria convencional de potência ativa e reativa apresenta limitações que restringem sua aplicação a sistemas balanceados, sem distorção harmônica e em regime permanente. A teoria p-q surgiu como alternativa às limitações da teoria convencional para aplicações mais genéricas. Essa abordagem define um conjunto de potências instantâneas no domínio do tempo. Uma vez que não

há restrições impostas no comportamento das tensões e correntes, pode-se aplicar essa teoria para sistemas trifásicos com ou sem condutor neutro, para formas distorcidas de tensão e de corrente. Além disso, essa teoria é válida tanto para regime permanente quanto transitório (AKAGI et al, 2007).

A decomposição das potências ativa e reativa instantâneas definidas pela teoria p-q em um sistema trifásico é exemplificada na Fig. 3.

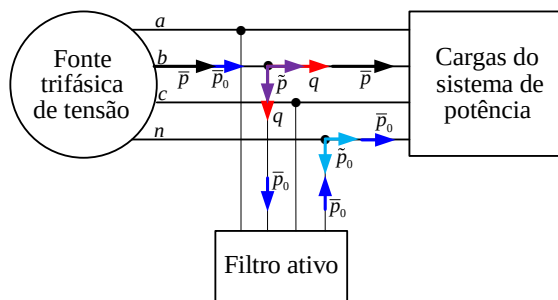


Figura 3 – Fluxos de potências no sistema controlado com base na teoria p-q

Em que: $\bar{p}$ representa o valor médio da potência ativa instantânea, $\tilde{p}$ representa o valor alternado da potência ativa instantânea, $\bar{p}_0$ representa o valor médio da potência de sequência zero instantânea, $\tilde{p}_0$ representa o valor alternado da potência de sequência zero instantânea e o termo q representa a potência reativa e são válidas as mesma denominações. Esse método de compensação faz com que a fonte forneça apenas o valor médio da potência ativa instantânea $\bar{p}$ e o valor médio da potência de sequência zero $\bar{p}_0$. O filtro ativo, por sua vez, é o responsável por fornecer a potência reativa instantânea q , incluindo sua parte oscilante $\tilde{q}$ e média $\bar{q}$, o valor alternado da potência de sequência zero $\tilde{p}_0$ e a parte

alternada da potência ativa instantânea $\tilde{p}$ (Watanabe et al, 2008).

Vale ressaltar que as relações entre essas componentes é dada por:

$$\begin{cases} p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \\ p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (1)$$

Um dos aspectos fundamentais desta teoria é a utilização da transformação de Clarke, em que as coordenadas abc são transformadas nas coordenadas $\alpha\beta 0$. Para sistemas trifásicos a três fios, as componentes de sequência zero são nulas, de sorte que apenas os eixos α e β existem e o produto $v_0.i_0$ é nulo. Para essa situação, têm-se as seguintes relações válidas:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \\ q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \end{cases} \quad (4)$$

Combinando as equações (2) e (3) e as aplicando na equação (4), tem-se:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (5)$$

A equação (5) é particularmente interessante, pois relaciona as correntes dos eixos α e β com as potências ativa e reativa instantâneas. Em vez de compensar diretamente as correntes distorcidas geradas pela fonte, visto que é trabalhoso mapear todo o espectro harmônico dessas correntes, pode-se utilizar uma estratégia de compensação das potências instantâneas da teoria p-q, compensando indiretamente as correntes geradas.

Da equação (1), é possível observar que ambas as potências instantâneas apresentam componentes média e oscilante, portanto é possível filtrar a componente desejada de forma simples e eficiente. Utilizando essa metodologia, as novas correntes dos eixos α e β podem ser expressas por:

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_c^* \\ q_c^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

Em que p_c^* e q_c^* são os resultados das compensações de p e q , respectivamente. i_{ca}^* e i_{cb}^* são as correntes compensadas indiretamente dos eixos α e β .

Novamente, pode-se retornar para o sistema abc através da transformada inversa, já para os valores corrigidos de corrente i_{ca}^* , i_{cb}^* e i_{cc}^* , através da expressão (8).

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

A estratégia do controlador de um filtro ativo baseado na teoria p-q, utilizando a técnica descrita, é resumida através do fluxograma apresentado na Fig. 4.

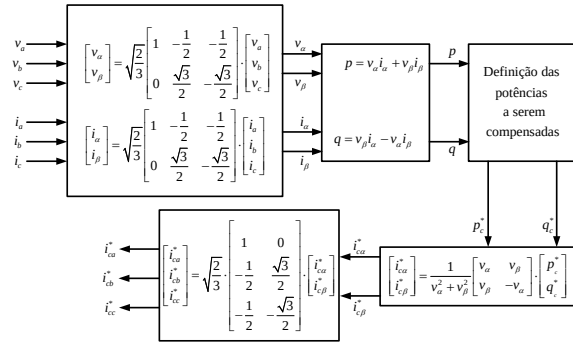


Figura 4 – Método geral de controle por compensação de corrente

3.1 Definição do tipo de compensação escolhida e configuração do filtro ativo

Uma vez que a componente reativa da potência total não contribui para o fluxo de potência da fonte para a carga; e apenas a componente média da potência ativa é responsável por esse fluxo, pode-se escolher a parte oscilante da componente de potência ativa e toda a potência reativa para serem compensadas (Bhavsar & Patel, 2011).

A Fig. 5 mostra o caso de compensação para $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$. Todas as componentes de corrente indesejáveis da carga são eliminadas. As correntes compensadas são praticamente senoidais, produzindo assim uma potência ativa constante e não gera/consome potência reativa. A carga não linear e o filtro se comportam como uma carga puramente resistiva.

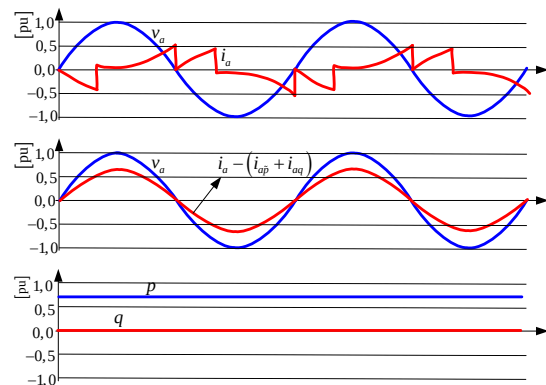


Figura 5 – Compensação de corrente através das componentes $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$.

Do ponto de vista de utilização em filtros ativos, essa metodologia de compensação é a mais indicada,

embora possua a restrição de ser aplicada apenas para circuitos trifásicos balanceados a três fios (Watanabe et al, 2008).

4 Configuração proposta

O circuito do filtro ativo completo empregado, incluindo a estratégia de controle implementada neste trabalho, para compensação de harmônicos de um GSIP conectado à rede elétrica, é mostrado na Fig. 6 (Bhavsar & Patel, 2011).

As tensões e correntes geradas são coletadas através de sensores. Essas grandezas são compensadas através da técnica mostrada na Fig. 4. A potência instantânea alternada é obtida através de um filtro de pri-

meira ordem com frequência de corte em 20 Hz. Um controle do tipo SPWM com frequência de chaveamento de 30 kHz é utilizado para acionar as chaves do inversor, tendo como entrada as correntes compensadas i_{ca}^* , i_{cb}^* e i_{cc}^* e as correntes da saída do inversor i_{fa} , i_{fb} e i_{fc} como realimentação. A tensão no capacitor do filtro (1 mF) é também monitorada e o controle é responsável por manter essa tensão estável. Os controladores utilizados são do tipo PI, sintonizados com auxílio do método Ziegler-Nichols. O resultado é a injeção de correntes compensadas através do monitoramento do sinal gerado, com objetivo de eliminar harmônicos de corrente e aumentar o fator de potência do sistema.

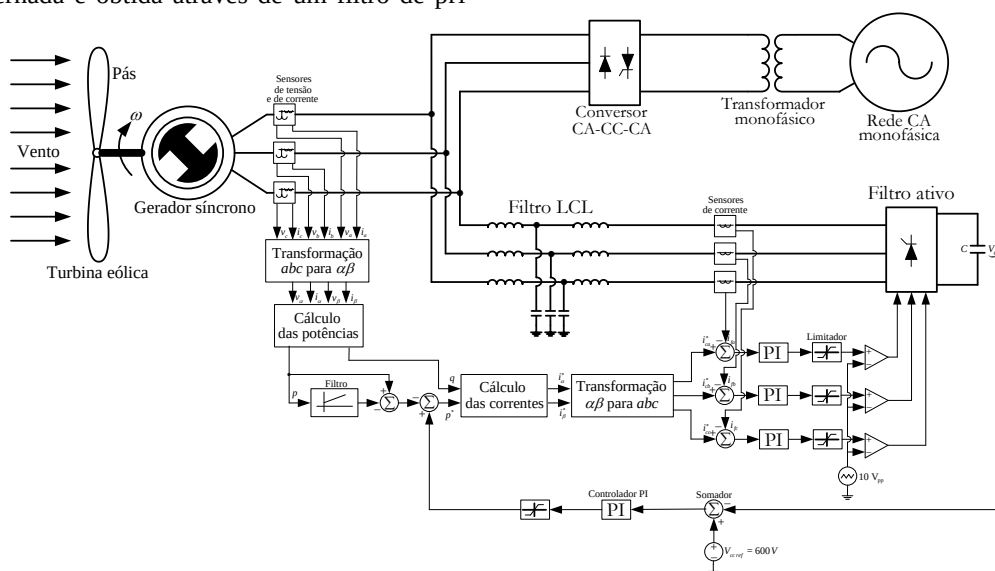


Figura 6 – Circuito completo do filtro ativo

5 Análise de Resultados

O comportamento do vento adotado na análise dos resultados é mostrado na Fig. 7. Adotou-se uma velocidade de vento base de 6 m/s nos primeiros quatro segundos de simulação, uma rampa com quatro segundos de duração até atingir-se a velocidade de vento nominal de 12 m/s.

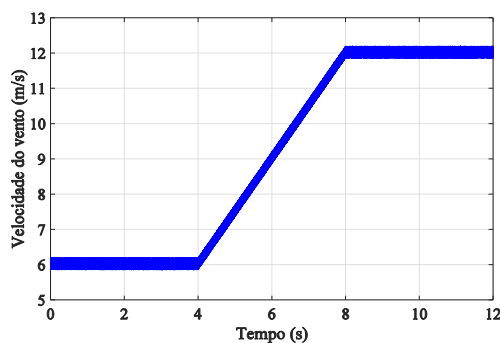


Figura 7. Regime de vento adotado na simulação.

Na Fig. 8, tem-se a comparação entre a potência ativa entregue à rede pelo AGPP com e sem o filtro ativo.

Observa-se que a presença do filtro ativo não afeta a potência entregue de forma significativa. Considerando aqueles 6 kW de projeto para a velocidade nominal, o rendimento do AGPP sem o filtro foi de 95,2%, enquanto que o rendimento após a inserção do filtro foi de 96,8%.

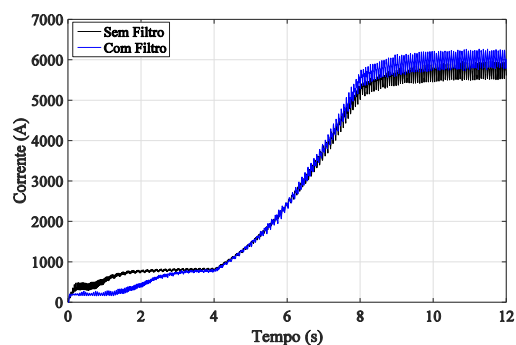


Figura 8. Potência ativa entregue a rede.

Na sequência, são mostrados os efeitos da compensação na tensão e na corrente, em comparação com a resposta do sistema sem a presença do filtro. A Fig. 9 apresenta as formas de ondas das tensões e das cor-

rentes geradas pelo GSIP sem e com a presença do filtro para a velocidade de vento base de 6m/s.

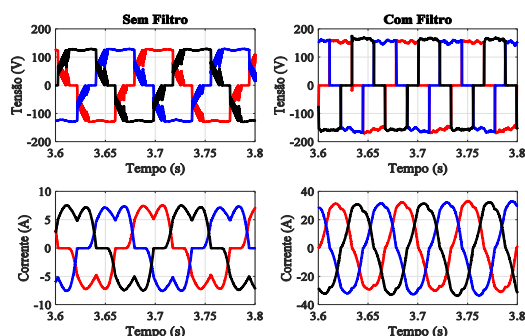


Figura 9. Formas de onda das tensões e das correntes sem e com filtro a 6 m/s.

Conforme os dados da Tabela 1, com a utilização do filtro ativo reduziu-se em 63% a Distorção Total de Tensão (DTT) gerada pelo GSIP operando com a velocidade de vento base. Para a Distorção Total de Corrente (DTI), a redução foi cerca de 61%. Houve uma melhora do Fator de Potência (FP) da máquina, embora tenha havido uma redução da potência ativa entregue de cerca de 18,7 %, principalmente devido à influência do filtro ativo no controle de máxima potência do sistema.

Tabela 1 – Comparação para regime de vento de 6 m/s

Situação	Freq. (Hz)	DTI (%)	DTT (%)	FP	P _{ger} (kW)	P _{ent} (kW)
Sem filtro	8,58	25,66	16,03	0,95	0,80	0,76
Filtro ativo	7,85	9,91	5,93	0,98	0,78	0,61

O espectro harmônico da tensão para o vento base é mostrado na Fig. 10.   possível constatar a mitigação dos harmônicos característicos, em especiais, o 5  e o 7  oriundos do processo de retificação. O filtro ativo garante que todos os componentes harmônicos individuais ímpares ficam abaixo de 5%. Vale destacar que os harmônicos de alta frequência não são significativos e por isso foram negligenciados. Percebe-se um aumento do 2  harmônico, mas permanece dentro dos limites aceitáveis (5%), devido a uma pequena assimetria nas formas de onda decorrentes da ação do filtro.

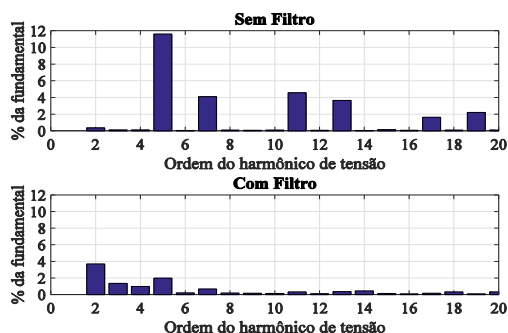


Figura 10. Espectro harmônico da tensão a 6 m/s.

O espectro harmônico da corrente, por sua vez, é mostrado na Fig. 11. Novamente, constatou-se uma mitigação eficaz dos principais harmônicos caracte-

rústicos. O limite de 5% dos harmônicos ímpares foi obedecido, enquanto os harmônicos de alta frequência não foram evidenciados.

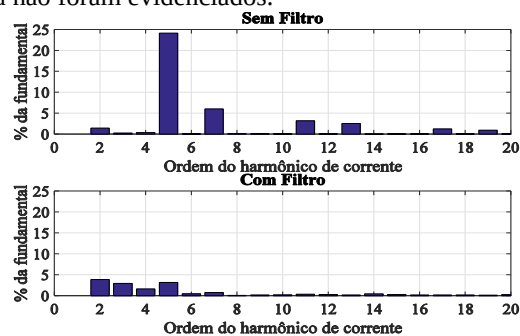


Figura 11. Espectro harmônico da corrente a 6 m/s.

A Fig.12 apresenta as formas de ondas das tensões e das correntes geradas pelo GSIP sem e com a presença do filtro ativo para uma velocidade de vento nominal de 12 m/s.

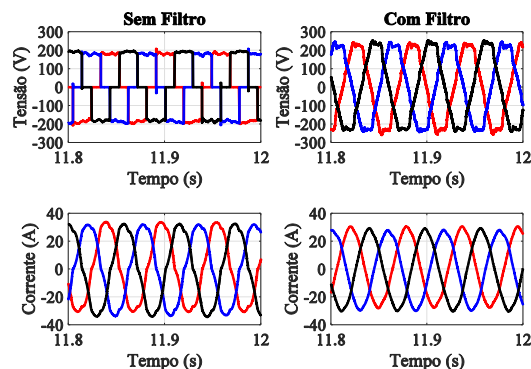


Figura 12. Formas de ondas das tensões e das correntes sem e com filtro a 12 m/s.

Conforme os dados fornecidos na Tabela 2, com a utilização do filtro ativo, a DTT gerada pelo GSIP operando em regime nominal   reduzida em 71,5%. Para a DTI, a redução   de cerca de 35%. Evidencia-se uma melhora também no fator de potência da máquina ao custo de uma ligeira redução de 5% na potência ativa entregue.

Tabela 2 – Comparação para regime de vento de 12 m/s

Situação	Freq. (Hz)	DTI (%)	DTT (%)	FP	P _{ger} (kW)	P _{ent} (kW)
Sem filtro	17,20	8,97	31,65	0,94	5,71	5,64
Filtro ativo	16,50	5,83	9,06	0,99	5,81	5,34

O espectro harmônico da tensão para o vento nominal é mostrada na Fig. 13. Novamente, constata-se a mitigação dos harmônicos característicos, em especiais o 5  e o 7  oriundos do retificador de seis pulsos. O filtro ativo garante que todos os componentes harmônicos individuais ímpares fiquem abaixo de 5%.

O espectro harmônico da corrente para o regime de vento nominal, por sua vez, é mostrado na Fig. 14. Mais uma vez, o filtro ativo garante que todos os componentes harmônicos individuais ficam abaixo de 5%.

Através dos resultados expostos, é possível perceber que o filtro ativo adotado mostra-se eficaz na redução da DTT e DTI para o regime de vento turbulento apresentado na Fig. 7, o qual engloba um comportamento genérico de um AGPP conectado à rede elétrica convencional.

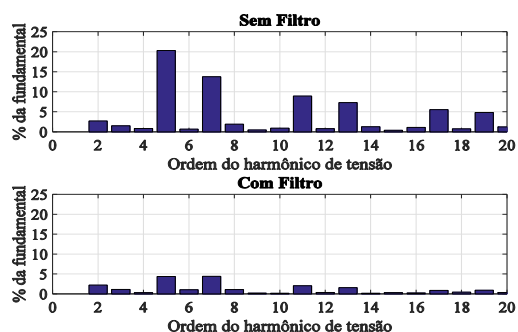


Figura 13. Espectro harmônico de tensão a 12 m/s.

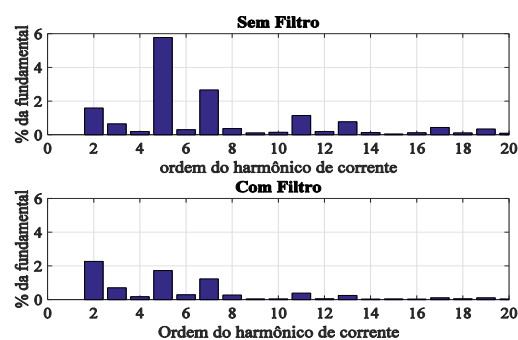


Figura 14. Espectrograma harmônico de corrente a 12 m/s.

6 Conclusão

Este artigo apresentou uma proposta de aplicação de filtro ativo, baseado na teoria p-q, para mitigação de conteúdo harmônico em um gerador síncrono de ímã permanente conectado à rede elétrica através de um conversor CA-CC-CA.

Observou-se que, tanto para operação em ventos fracos (6 m/s), quanto para operação em regime de vento nominal (12 m/s), o filtro ativo teve comportamento adaptativo, garantindo alto fator de potência e redução satisfatória da distorção harmônica total e individual.

A configuração proposta mostra-se promissora para a preservação e melhoria do desempenho do gerador síncrono de ímã permanente aplicado à microgeração eólica.

Propõem-se, para continuidade dos estudos, a investigação de técnicas de otimização do sistema, especialmente para sintonização dos controladores e garantia do funcionamento harmonioso entre o conversor de interligação e o filtro ativo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tec-

nológico – CNPq pelo apoio financeiro concedido através do fornecimento de bolsas de iniciação científica.

Referências Bibliográficas

- Akagi, H.; Kanazawa, Y.; Nabae, A.; (1984). Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. IEEE transactions on industry applications, Vol. IA-20, N^o 3.
- Akagi, H.; Watanabe, E. H; Aredes, M.; (2007). Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press/Wiley Interscience.
- Arifujjaman, Md.; (2010). Modeling, Simulation and Control of Grid Connected Permanent Magnet Generator (PMG)-based Small Wind Energy Conversion System. 2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference.
- Bhavsar, P. R; Patel, P. J.; (2011). Shunt active filter PSIM based simulation and analysis using p-q theory. Proc. of the International Conference on Science and Engineering, ICSE.
- Deblasio, R.; Tom, C.; (2008). Standards for the Smart Grid. Energy 2030 Conference. IEEE.
- Dewan, S. B.; Shahrodi, E. B.; (1985). Design of an input filter for the six-pulse bridge rectifier. IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-21, pp. 1168-1175.
- Gómez, J. C.; Vaschetti, J. C.; C.; Ibarlucea, C.; (2013). Distributed Generation: Impact on Protections and Power Quality. IEEE Latin America Transactions, Vol. 11, N^o 1.
- IEEE, (1992), IEEE Standard Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems. IEEE Std. 519-1992.
- IEEE, (2003), IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric. IEEE Std. 1547-2003.
- Pinto, A. C.; dos Santos Neto, P. J.; (2015). Modelagem e Simulação de um Sistema de Geração Distribuída Baseado na Utilização de Aerogeradores de Pequeno Porte. Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol.17, N^o 1.
- Singh, M.; Khadkikar, V.; Chandra, A.; Varma, R. K.; (2011). Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution Level With Power-Quality Improvement Features. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, N^o 1.
- Wang, H.; Nayar, C. Su; J., Ding, M.; (2011). Control and Interfacing of a Grid-Connected small-Scale Wind Turbine Generator. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, N^o 2.
- Watanabe, E. H.; Akagi, H.; Aredes, M.; (2008). Instantaneous p-q power theory for compensating nonsinusoidal systems. 2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation.