

PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM INVERSOR TRIFÁSICO PARA INTERLIGAÇÃO DE AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE

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

*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*

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

Abstract – This paper aims to present, in a didactic way, the design of a control loop to be utilized in a three-phase frequency inverter that will connect a small wind turbine to the electric grid. The operation of the wind system composed of a 6 kW turbine, when subjected to a wind regime of 12 m/s, interconnected to the grid through an AC-DC-AC converter is analysed in order to validate the control technique. The control loop's goal is to ensure the injection of active power with power quality into the grid so featuring a Distributed Generation (DG). Simulation results from PSIM software are analysed with the wind system connected to a three-phase electrical grid of 380 V.

Keywords - Wind energy, Distributed generation, Microgeneration, Three-phase inverter, LCL Filter.

Resumo – O presente artigo tem como objetivo apresentar, de uma forma didática, o projeto de uma malha de controle a ser utilizada em um inversor de frequência trifásico que interligará um aerogerador de pequeno porte à rede elétrica. O funcionamento do sistema eólico composto por um aerogerador de 6 kW de potência, quando submetido a um regime de vento de 12 m/s, interligado à rede através de um conversor CA-CC-CA, será analisado tendo em vista a validação da técnica de controle utilizada. O objetivo da malha de controle é garantir a injeção de potência ativa na rede elétrica com qualidade caracterizando assim uma Geração Distribuída (GD). Os resultados computacionais obtidos no *software* PSIM são analisados com o sistema eólico conectado a uma rede elétrica de distribuição trifásica de 380 V.

Palavras-chave - Energia eólica, Geração Distribuída, Microgeração, Inversor trifásico, Filtro LCL.

1 Introdução

Nos últimos anos, o modelo centralizado de geração de energia oriundo, principalmente, de grandes centrais hidrelétricas e termelétricas conectadas aos consumidores finais por meio de linhas de transmissão vem passando por modificações com o advento da Geração Distribuída (GD). Além disso, a geração distribuída vem incentivando a utilização de fontes alternativas de energia e, assim, contribuindo com a segurança do sistema elétrico nacional por meio da diversificação da matriz energética (LEÃO, 2009).

A resolução normativa nº 482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) permite que o consumidor instale pequenos geradores em sua unidade consumidora e injete energia na rede de distribuição em troca de créditos de energia que poderão ser utilizados quando houver consumo inferior à geração (BRASIL, 2012). Tal regulamentação somente é válida para geradores que utilizam fontes incentivadas (hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração). A ideia é possibilitar aos consumidores a utilização de fontes renováveis de energia, entre elas Aerogeradores de Pequeno Porte (AGPP) (SALES, 2014).

No caso de aerogeradores de pequeno porte, para a conexão desses à rede elétrica de distribuição é necessária a utilização de conversores estáticos de potência. Estes conversores são capazes de realizar o desacoplamento entre a frequência da unidade geradora, na maioria dos casos variável, e a frequência fixa da rede elétrica convencional.

Para obter o modelo matemático do inversor parte-se

da premissa que o mesmo poder ser modelado como um conversor *buck*, diferindo apenas por possuir tensões e correntes alternadas em sua saída (SILVA, 2012). O modelo matemático do conversor *buck* pode ser obtido através de duas técnicas: (a) Emprego do Conceito de Modelo Médio em Espaço de Estados (BARBI, 2014) e (b) Modelo CA da Chave PWM (BASCOPÉ, SD).

Apesar de ser um dispositivo amplamente utilizado na conexão de aerogeradores à rede elétrica, sua operação faz com que a tensão do Ponto de Acoplamento Comum (PAC) e a corrente injetada na rede elétrica apresentem um elevado grau de distorção harmônica. O Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) admite no máximo 10% de distorção harmônica na tensão em barramentos com tensões menores que 1 kV (BRASIL, 2016). Já a norma IEEE Std. 519-1992 admite no máximo 5% de distorções harmônicas em tensões e correntes de barramentos com até 69 kV (IEEE, 1992).

Para garantir níveis adequados de distorção harmônica nas grandezas elétricas na saída de inversores, torna-se necessário a inserção de filtros. O filtro LCL vem sendo largamente adotado por apresentar uma saída indutiva para a rede (ARAÚJO, 2012).

Este trabalho consiste em apresentar, de uma forma didática, o projeto da malha de controle para inversor de frequência trifásico utilizando a técnica proposta por Venable (1983). O modelo matemático do inversor será obtido com base no conceito do Modelo CA da Chave PWM, proposto por Bascopé (SD). Por fim, o desempenho em relação ao conteúdo harmôni-

co das grandezas elétricas do sistema eólico-elétrico será analisado com e sem a presença de um filtro passivo na saída do inversor.

2 Sistema Eólico-Elétrico Implementado

A Figura 1 ilustra o sistema implementado computacionalmente no *software* PSIM. Esse sistema é

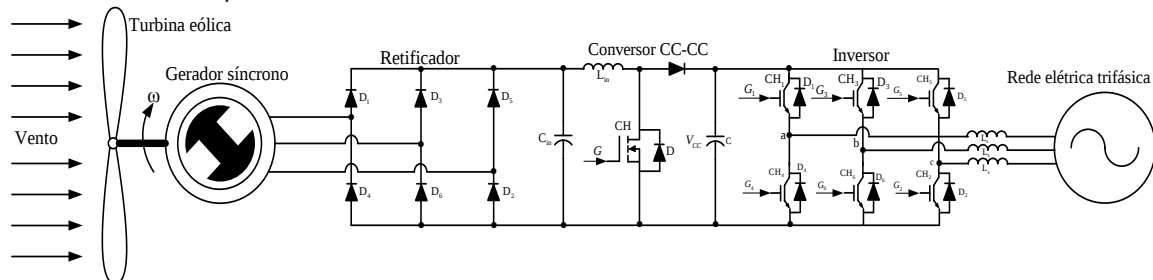


Figura 1 - Esquema do sistema eólico conectado à rede elétrica de distribuição trifásica por meio de um conversor CA-CC-CA

O dimensionamento dos demais componentes do sistema encontra-se detalhado em Pinto & dos Santos Neto (2015). No entanto, os valores de alguns componentes são necessários para proceder o projeto do inversor. São eles: o capacitor C na entrada do inversor, o indutor L_{in} do conversor *boost* e a indutância L_s do indutor de interface na saída do inversor. Os valores empregados são: $C = 5,1 \text{ mF}$, $L_{in} = 146,67 \mu\text{H}$ e $L_s = 3 \text{ mH}$ (PINTO & DOS SANTOS NETO, 2015).

A Figura 2 ilustra o inversor trifásico implementado e seu respectivo sistema de controle.

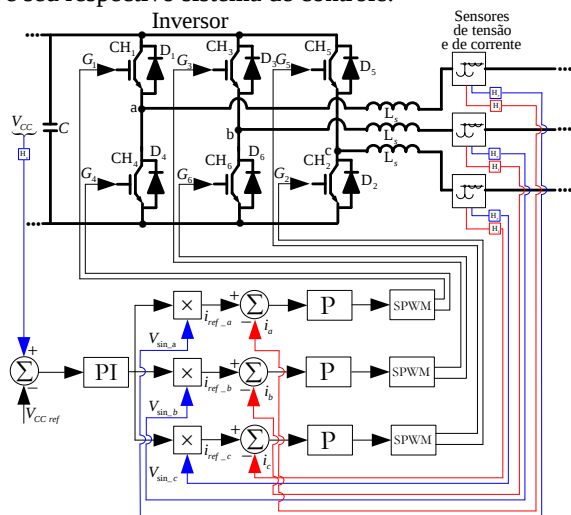


Figura 2 - Inversor implementado e seu respectivo sistema de controle

Para projetar o controle de um inversor trifásico pode-se arquitetar o controle para um inversor monofásico e, ao final, replicá-lo às outras duas fases. O controle utilizado nesse projeto foi o controle por corrente média consistindo em uma malha, com compensador, para controlar a tensão do barramento CC (V_{cc}), proposto por Silva (2012). A modulação utilizada para acionar as chaves do inversor foi a modulação por largura de pulso

composto por um aerogerador de pequeno porte de 6 kW de potência quando submetido a um regime de vento nominal de 12 m/s. Neste trabalho será detalhado o projeto do inversor de frequência trifásico necessário para a integração do aerogerador de pequeno porte à rede elétrica de distribuição secundária.

senoidal (SPWM - *Sinusoidal Pulse Width Modulation*) unipolar (SILVA, 2012).

A partir da tensão de fase da rede elétrica, obtida por meio do ganho H_r , é criado um sinal de sincronismo V_{sin} para fase e frequência da corrente injetada na rede. O compensador de tensão regula a amplitude desse sinal de sincronismo, através de um multiplicador, e assim controla o valor eficaz da corrente injetada na rede a fim de manter a tensão do barramento CC igual a um valor predefinido.

O modelo matemático que relaciona a tensão no barramento CC (V_{cc}) com a corrente de saída do inversor (I_{ls}) foi obtido utilizando o Modelo de Pequenos Sinais da Chave PWM (BASCOPE, SD).

A Figura 3 ilustra o modelo CA da chave PWM do conversor *buck*.

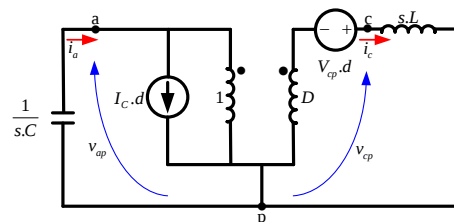


Figura 3 - Modelo CA da Chave PWM do conversor *buck*

De posse da Figura 3, chega-se as seguintes expressões (BASCOPE, SD):

$$v_{cp} = s.L.i_c \quad (1)$$

$$i_a = -s.C.v_{ap} \quad (2)$$

$$i_a = D.i_c + I_c.d \quad (3)$$

$$v_{cp} = D.v_{ap} + V_{ap}.d \quad (4)$$

Substituindo I_c por I_{ls} , V_{ap} por V_{cc} , (2) em (3) e (1) em (4) tem-se:

$$-s.C.v_{cc} = D.i_{ls} + I_{ls}.d \quad (5)$$

$$s.L.i_{ls} = D.v_{cc} + V_{cc}.d \quad (6)$$

Isolando d em (5) e substituindo em (6) obtém-se a expressão desejada:

$$G_v(s) = \frac{v_{cc}}{i_{ls}} = - \left(\frac{s.L.I_{ls} + V_{cc}.D}{s.V_{cc}.C - D.I_{ls}} \right) \quad (7)$$

Em que: $L = L_s$.

Utilizando o modelo matemático encontrado em (7) determina-se a Função de Transferência de Malha Aberta sem o compensador de tensão ($FTMA_{scv}$) do circuito da Figura 2 (HERTZ, 2010; TERÁN, 2012).

$$FTMA_{scv} = G_v(s).H_v(s).V_{sin} \cdot \frac{1}{H_i(s)} \quad (8)$$

Em que:

$$H_v(s) = \frac{V_{ref}}{V_{cc}} = 0,008125 \quad (9)$$

$$V_{sin} = 1V \quad (10)$$

$$H_i(s) = \frac{V_{ref}}{I_{lspk}} = 0,5054 \quad (11)$$

Sendo: $V_{ref} = 6,5V$: tensão de referência do compensador. $V_{cc} = 800V$: tensão nominal desejada na entrada do inversor. $I_{lspk} = 12,86A$: valor de pico da corrente injetada na rede. $H_v(s)$: ganho do sensor de tensão. V_{sin} : amplitude do sinal de sincronismo. $H_i(s)$: ganho do sensor de corrente.

O diagrama de bode da $FTMA_{scv}$ é apresentado na Figura 4.

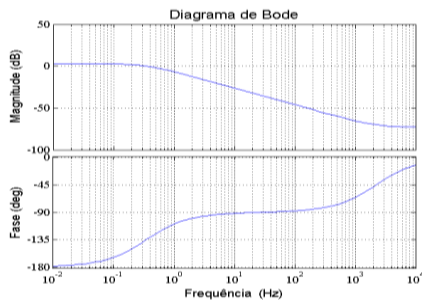


Figura 4 - Digrma de Bode da $FTMA_{scv}$

Na sequência será definida a frequência de cruzamento desejada e será feito o projeto do compensador de tensão utilizando a técnica do fator K, proposta por Venable (1983).

1) Frequência de cruzamento f_c

Para garantir que a técnica de controle funcione corretamente, é preciso garantir o desacoplamento entre malha de tensão e a malha de corrente, essa última sem o compensador de corrente. O desacoplamento entre as malhas irá ocorrer para uma frequência de cruzamento, na malha de tensão, menor que 30 Hz (TERÁN, 2012). Dessa forma, adotou-se uma frequência de cruzamento de:

$$f_c = 20 \text{ Hz} \quad (12)$$

Analisando a Figura 4, para a frequência de cruzamento adotada, tem-se um atraso de fase (P) de:

$$P = -90^\circ \quad (13)$$

2) Margem de Fase MF

A margem de fase adotada é (VENABLE, 1983):

$$MF = 60^\circ \quad (14)$$

3) Ganho do compensador a_v

Para obter uma margem de fase de 60° na frequência de cruzamento adotada, o ganho (a_v) do compensador deve ser de (HERTZ, 2010):

$$a_v = -20 \cdot \log(|FTMA_{scv}(2\pi \cdot f_c)|) = 32 \text{ dB} \quad (15)$$

4) Avanço de fase requerido α

O avanço de fase requerido é dado por (HERTZ, 2010):

$$\alpha = MF - P - 90^\circ = 60^\circ \quad (16)$$

5) Escolha do compensador

Como o avanço de fase requerido é menor que 90° é adotado o compensador Tipo 2, PI com filtro (VENABLE, 1983). A Figura 5 ilustra o compensador utilizado.

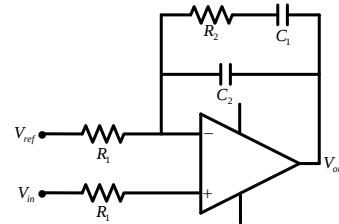


Figura 5 - Estrutura do compensador Tipo 2

6) Determinação do fator K

De acordo com Venable (1983), tem-se:

$$K = \tan\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{360^\circ}\right) + \left(\frac{\pi}{4}\right) = 3,8 \quad (17)$$

7) Determinação dos componentes do compensador

O ganho do compensador G_{av} , em valor absoluto, é dado por (HERTZ, 2010):

$$G_{av} = 10^{\left(\frac{a_v}{20}\right)} = 40 \quad (18)$$

Adotando:

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega \quad (19)$$

Chega-se em (VENABLE, 1983):

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_c \cdot G_{av} \cdot K \cdot R_1} = 23 \text{ nF} \quad (20)$$

$$C_1 = C_2 \cdot (K^2 - 1) = 2 \text{ nF} \quad (21)$$

$$R_2 = \frac{K}{2\pi \cdot f_c \cdot C_1} = 1300 \text{ k}\Omega \quad (22)$$

O controlador utilizado apresenta a configuração não inversora devido à $FTMA_{scv}$ ser negativa (HERTZ, 2010). A função de transferência do compensador da Figura 5 é:

$$C_v(s) = \frac{s^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 + s(R_1 \cdot C_1 + R_1 \cdot C_2 + R_2 \cdot C_1) + 1}{s^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 + s \cdot R_1 \cdot (C_1 + C_2)} \quad (23)$$

Com isso, a Função de Transferência de Malha Aberta com o compensador de tensão ($FTMA_{ccv}$) é dada por (HERTZ, 2010):

$$FTMA_{ccv}(s) = FTMA_{scv}(s) \cdot C_v(s) \quad (24)$$

O diagrama de bode da malha de tensão incluindo o compensador é apresentado na Figura 6.

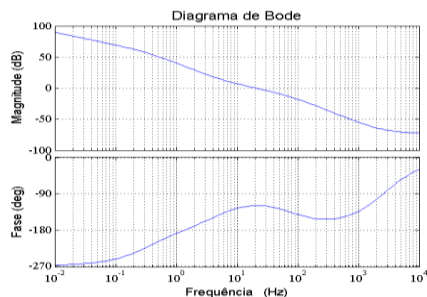


Figura 6 - Diagrama de bode da $FTMA_{cv}$

Analisando a Figura 6 pode-se observar que na frequência de corte adotada, o atraso de fase fica em torno de -120° , o que implica em uma margem de fase de 60° . Essa característica garante estabilidade ao sistema e uma boa resposta transitória.

Para melhorar a qualidade da energia entregue pelo aerogerador à rede elétrica foi utilizado um filtro LCL trifásico na saída do inversor. A Figura 7 ilustra a topologia do filtro LCL trifásico utilizado, sendo que os critérios de projeto deste filtro podem ser encontrados em Araújo (2012) e Queiroz (2014).

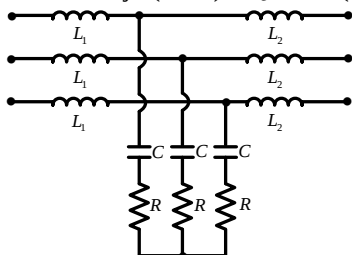


Figura 7 - Topologia do filtro LCL utilizado

3 Resultados Computacionais

A Figura 8 ilustra o regime de vento empregado neste estudo. É adotada uma velocidade de vento base de 6 m/s nos primeiros quatro segundos, seguida de uma rampa de quatro segundos de duração até atingir a velocidade de vento nominal de 12 m/s e permanecendo neste valor até o fim da análise.

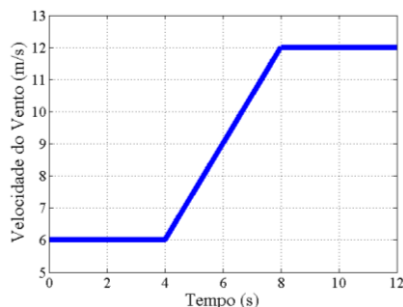


Figura 8 - Regime de vento adotado

A tensão no barramento CC (V_{cc}) é ilustrada na Figura 9. Pode-se observar que o controle de tensão atua de maneira eficiente mantendo a tensão no barramento CC (V_{CC}) em 800 V. Além disso, a ondulação da tensão de entrada do inversor permanece menor que 5% (V_{ripple}), valor este estabelecido no projeto.

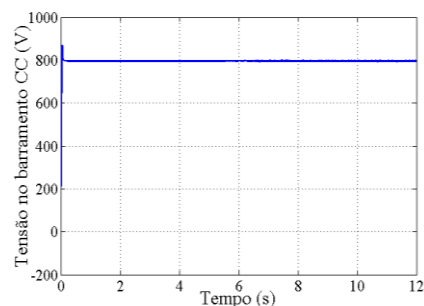


Figura 9 - Tensão na entrada do inversor

A seguir, são mostrados os resultados das tensões e correntes no PAC para o sistema sem filtro e com filtro. A Figura 10 apresenta as tensões no PAC para um regime de vento de 6 m/s.

As tensões de fase sem o filtro apresentam um valor eficaz de 224 V e uma DTT (Distorção Harmônica Total de Tensão) de 22%. Com a inserção do filtro LCL na saída do inversor, esses valores são 219 V e 0,8%, respectivamente. Dessa forma, o filtro LCL mostra-se eficaz, mantendo a DTT dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e pela norma IEEE Std. 519-1992.

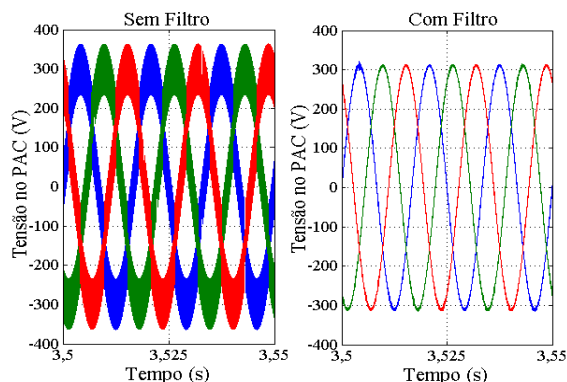


Figura 10 - Tensões no PAC sem filtro e com filtro a 6 m/s

A Figura 11 ilustra as correntes injetadas na rede elétrica para um regime de vento de 6 m/s.

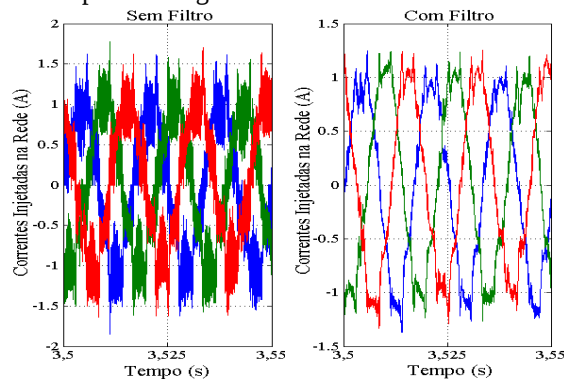


Figura 11 - Correntes injetadas sem filtro e com filtro a 6 m/s

As correntes, sem o filtro, apresentam um valor eficaz de 0,8 A e uma DTI (Distorção Harmônica Total de Corrente) de 30%. Com inserção do filtro LCL o valor eficaz das correntes permanece o mesmo e a DTI é reduzida para 10%. Dessa forma, o filtro LCL não é tão eficaz em relação à distorção harmônica da corrente. Apesar da redução na DTI, os padrões esta-

belecionados pela norma IEEE Std. 519-1992 não são alcançados.

A Figura 12 apresenta as tensões no PAC para um regime de vento de 12 m/s. Estas, sem o filtro, apresentam um valor eficaz de 228 V e uma DTT de 23%. Enquanto, na presença do filtro LCL, possuem valor eficaz de 222 V e DTT de 1%. Assim, o filtro LCL mostra-se novamente eficaz ao manter os níveis de tensão e de DTT no PAC dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e pela norma IEEE Std. 519-1992.

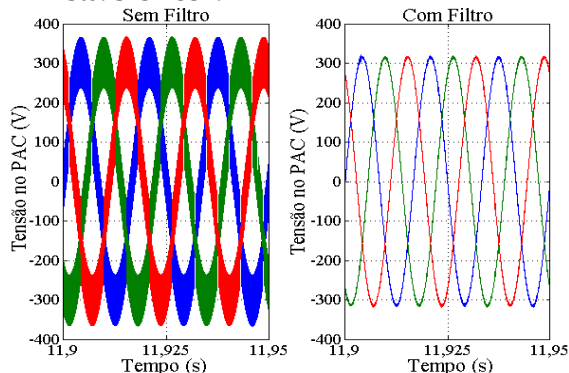


Figura 12 - Tensões no PAC sem filtro e com filtro a 12 m/s

A Figura 13 ilustra as correntes injetadas na rede elétrica para um regime de vento de 12 m/s.

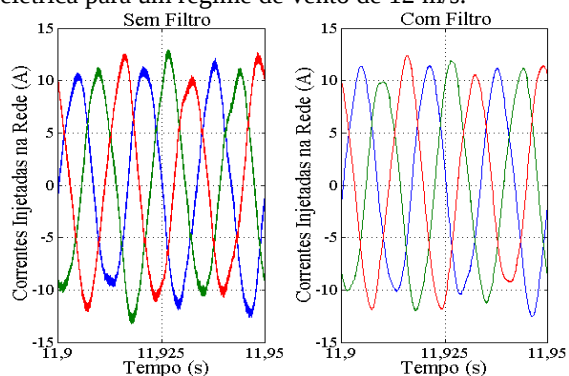


Figura 13 - Correntes injetadas sem filtro e com filtro a 12 m/s

As correntes injetadas na rede sem o filtro apresentam um valor eficaz de 7,7 A e uma DTI de 10%. Com inserção do filtro LCL, o valor eficaz das correntes permanece o mesmo e a DTI é reduzida para 3%. Assim, o filtro LCL é eficaz em relação à distorção harmônica de corrente, pois o conteúdo harmônico permanece dentro do limite estabelecido pela norma IEEE Std. 519-1992.

A Figura 14 mostra a defasagem de 180° entre a corrente injetada na rede e a tensão de fase no PAC. Dessa forma, fica evidente que o aerogerador está injetando potência ativa na rede elétrica como desejado.

O espectro harmônico da tensão no PAC para o vento base é mostrado na Figura 15. O filtro LCL diminui a DIT (Distorção Harmônica Individual de Tensão) do PAC e garante que todos os harmônicos individuais fiquem abaixo dos 3% estabelecidos pela norma IEEE Std. 519-1992.

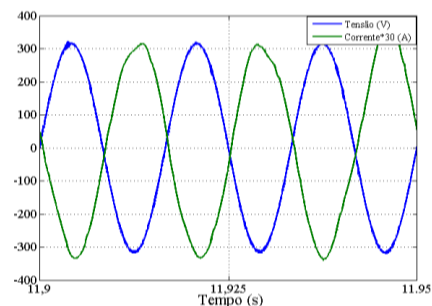


Figura 14 - Defasagem entre tensão e corrente do PAC na fase A

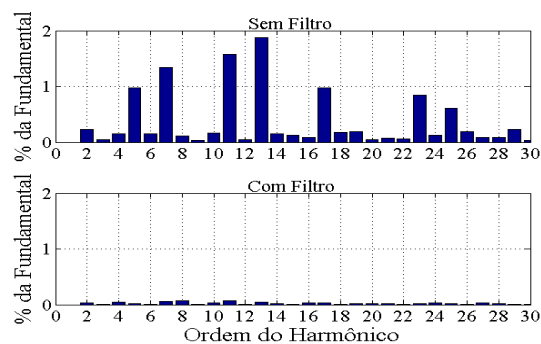


Figura 15 - Espectro harmônico da tensão do PAC a 6 m/s

O espectro harmônico da corrente para o vento base é ilustrado na Figura 16.

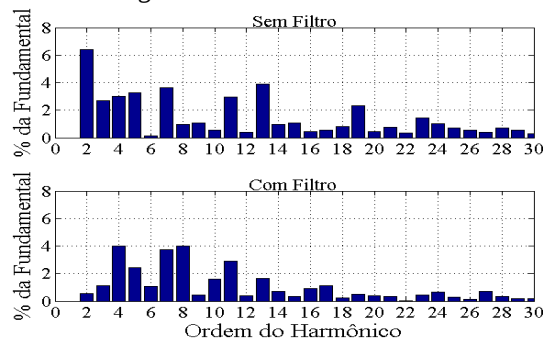


Figura 16 - Espectro harmônico da corrente injetada a 6 m/s

É possível constatar a mitigação dos harmônicos individuais. O filtro LCL diminuiu a DII (Distorção Harmônica Individual de Corrente) injetada na rede elétrica e garantiu que todos os componentes harmônicos individuais ficassem abaixo dos valores preestabelecidos pela norma IEEE Std. 519-1992.

O espectro harmônico da tensão no PAC para o regime de vento nominal é mostrado na Figura 17.

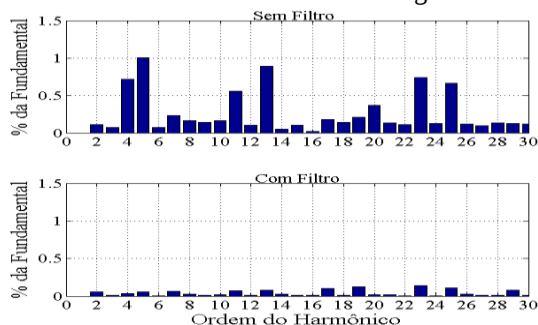


Figura 17 - Espectro harmônico na tensão do PAC a 12 m/s

O filtro LCL é eficaz também na mitigação dos harmônicos individuais presentes na tensão do PAC para o regime de vento nominal. O filtro garante que to-

dos os harmônicos individuais ficam abaixo daqueles 3% estabelecidos pela norma IEEE Std. 519-1992.

O espectro harmônico da corrente para o regime de vento nominal é ilustrado na Figura 18. O filtro LCL é eficaz ao diminuir os harmônicos individuais presentes na corrente injetada na rede elétrica para o regime de vento nominal. Dessa forma, o filtro garante que todos os harmônicos individuais fiquem abaixo dos valores estipulados pela norma IEEE Std. 519-1992.

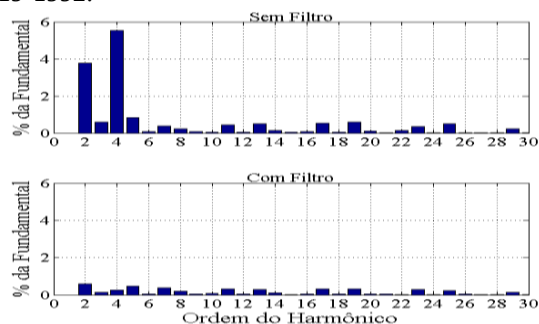


Figura 18 - Espectro harmônico da corrente injetada a 12 m/s

4 Conclusão

A estratégia de controle utilizada na malha de tensão do inversor mostrou-se eficaz ao garantir uma tensão no barramento CC constante. Com esse nível de tensão garantido na entrada do inversor foi possível garantir a injeção de potência na rede.

Devido aos níveis de distorção harmônica das tensões e correntes do PAC, oriundos da não linearidade do inversor de frequência, foi integrado ao sistema um filtro LCL na saída do inversor. Em relação à tensão do PAC, pode-se concluir que o filtro LCL mostrou-se eficaz ao manter a tensão nesse ponto com uma DTT menor que 5%, atendendo assim aos critérios de normas nacionais e internacionais. Porém quanto aos resultados de DTI injetadas na rede elétrica o filtro LCL não foi totalmente eficaz, para o regime de vento base, ao não atender normas internacionais que admitem no máximo 5% para a DTI. Os harmônicos individuais das tensões do PAC e das correntes injetadas na rede elétrica apresentaram valores abaixo dos valores máximos regulamentados pelas normas citadas neste trabalho.

O filtro LCL utilizado foi bastante eficaz na diminuição da DTT do PAC. Porém não foi obtido bons resultados no que se refere às correntes injetadas na rede. Para que o sistema proposto atenda aos padrões técnicos de normas internacionais torna-se necessário o estudo de outras topologias de filtros que garantam níveis adequados de distorção das correntes para quaisquer condições de vento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESB e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido através de bolsas de iniciação científica.

Referências Bibliográficas

- Araújo, R. D., (2012), Projeto e Simulação de Filtros L e LCL para Interconexão de Inversor NPC Trifásico à Rede. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará.
- Barbi, I., (2014), Modelagem de Conversores CC-CC Empregando Modelo Médio em Espaço de Estados, Florianópolis, Edição do Autor.
- Bascope, R. P. T., (Sem Data), Capítulo II: Modelagem de Conversores Operando em Modo de Condução Contínua - MCC Usando o Modelo da Chave PWM.
- Brasil, (2012), Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução Normativa N° 482. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>, Acesso em: 20 de Janeiro 2016.
- Brasil, (2016), Agência Nacional de Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8, “Qualidade da Energia Elétrica”, aprovado pela Resolução Normativa 664/2015.
- Hertz, G. A. T., (2010), Inversor Conectado a Rede Elétrica para Aplicação em Geração Distribuída Com Energia Fotovoltaica, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará.
- IEEE Std. 519-1992, (1992), IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems.
- Leão, R. P. S., (2009), Comprehensive Overview on Wind Power Integration to the Power Grid, IEEE Latin America Transactions, Vol. 7, No. 6.
- Pinto, A. C., dos Santos Neto, P. J., (2015), Modelagem e Simulação de um Sistema de Geração Distribuída Baseado em Aerogeradores de Pequeno Porte, Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol. 17, No. 1, pp. 9-46.
- Queiroz, S. S., (2014), Sistema Fotovoltaico Interligado à Rede Elétrica com Controle de Fluxo de Potência Feito por um Conversor CC-CC Isolado, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade federal do Ceará.
- Sales, C. J. D., (2014), Incentivos e Barreira à Geração Distribuída, Valor Econômico. Disponível em: http://www.acendebrasil.com.br/media/artigos/20140221_ValorEconomico.pdf Acesso em: 27 de Janeiro de 2016.
- Silva, C. E. A., (2012), Estudo e Desenvolvimento Experimental de um Sistema Eólico Interligado à Rede Elétrica, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará.
- Terán, E. M. M., (2012), Sistema Fotovoltaico de Pequeno Porte Interligado à Rede Elétrica, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará.
- Venable, H. D., (1983), The K Factor: A New Mathematical Tool For Stability Analysis and Synthesis, Proceeding of Powercon 10.