DOI10.48011/asba.v2i1.1498

Integração de uma Turbina Eólica de velocidade variável à rede elétrica utilizando conversor Back-to-Back

Américo Z. G. de Almeida * **Thiago T. Cardoso** *
Doulgas A. Fereira * **Janaína G. Oliveira** *

* *Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mail: americo.zille@engenharia.ufjf.br, thiago.trindade@engenharia.ufjf.br, douglas.ferreira@engenharia.ufjf.br e janaina.oliveira@ufjf.edu.br).*

Abstract: This paper presents the design of a control scheme that allows the interconnection of PMSG-based wind turbines to a low voltage electrical grid. The models of wind speed, wind turbine, PMSG and Back-to-Back converter connected to the grid are implemented in the PSIM simulation environment. The model of the generator connected to the rectifier is performed in synchronous coordinates, while the model of the converter connected to the power grid is performed in stationary coordinates. The results show that the proposed control technique is robust and feasible in connecting the wind generation to the power system.

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma estratégia de controle que possibilite a interconexão de turbinas eólicas baseadas em PMSG a rede elétrica de baixa tensão. Os modelos da velocidade do vento, da turbina eólica, do PMSG e do conversor *Back-to-Back* conectado a rede são implementados no ambiente de simulação PSIM. A modelagem do gerador conectado ao retificador é realizada em coordenadas síncronas, enquanto a modelagem do conversor conectado a rede elétrica é efetuada em coordenadas estacionárias. Os resultados mostram que a técnica de controle adotada é robusta e viável na conexão da geração eólica ao sistema de potência.

Keywords: Wind energy; Back-to-Back Converter; synchronous generator; PMSG; grid-connection.

Palavras-chaves: Energia eólica; conversor Back-to-Back; gerador síncrono; PMSG; conexão a rede.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o uso de fontes de energia renovável para a geração de energia elétrica vem se tornando cada vez mais um fator proeminente no desenvolvimento sustentável de um país. Grande parte dessa importância dá-se pela necessidade da diminuição do uso de combustíveis fósseis como fonte de energia primária para o processo de conversão eletromecânica de energia, o que gera como subprodutos, inerentes ao processo de conversão, a liberação de gases na atmosfera que são nocivos ao meio ambiente (Blaabjerg et al., 2011; Saidur et al., 2010).

O uso da energia eólica, tanto *onshore* quanto *offshore*, como fonte de energia primária para o processo de geração de energia elétrica vem se tornando, em diversos países, uma interessante alternativa para complementar o sistema de geração elétrica. Em termos de Brasil, o país apresenta um grande potencial eólico, possuindo um regime de ventos favorável que pode ser utilizado para a geração de energia, principalmente nas Regiões Sul, Sudeste e na Região Nordeste, com destaque para a última (Oliveira et al., 2019; Karnauskas et al., 2018; Ortiz and Kampel, 2011).

Contudo, a alta penetração de sistemas de geração dessa natureza à rede elétrica é, de certa forma, delicada, pois o processo de conversão eletromecânica de energia é realizado de forma estocástica o que, por sua vez, pode acarretar inúmeros problemas de natureza técnica ao sistema elétrico (Gautam et at., 2009).

Dessa forma, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos para investigar maneiras de aproximar a operação de uma planta de geração eólica a uma planta de geração despachável. Para isso, estudos consideram a análise tanto dos geradores de indução como dos geradores síncronos de imãs permanentes (PMSG, do inglês: *permanent magnet synchonous generator*). Todavia, o último vem se mostrando cada vez mais vantajoso em relação ao gerador de indução, oferecendo assim, melhor desempenho, melhor eficiência, menor stress mecânico, menor ruído, menor custo de manutenção e diminuição do peso no *nacelle*. Além disso, o gerador síncrono apresenta a possibilidade de prover suporte de potência reativa ao sistema elétrico que esteja conectado (Santos, 2015b; Wu et al., 2011; Teodorescu et al., 2011; Li et al., 2006).

Neste contexto, o presente trabalho aborda uma possível estratégia de controle que possibilite a interconexão de um

sistema de turbina eólica de velocidade variável acionada por um gerador síncrono de imãs permanentes à rede elétrica de média tensão através de um conversor de potência do tipo *Back-to-Back*. A modelagem da máquina elétrica é realizada em coordenadas síncronas, e o controle efetuado através de um controlador proporcional integral. Já o modelo do conversor conectado à rede elétrica é obtido em coordenadas estacionárias, e seu controle é realizado por meio de um controlador do tipo proporcional ressonante. Os resultados de simulação são obtidos por intermédio do software de simulação de circuitos elétricos PSIM.

A seguir, é apresentado a estrutura do trabalho. Na seção 2 é exposto o modelo do sistema de geração proposto; na seção 3 são descritas as peculiaridades da estratégia de controle adotada; na seção 4 são exibido os resultados de simulação e por fim, na seção 5 é apresentado as considerações finais.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

Na Figura 1 é mostrado um esquemático da interconexão do sistema de geração eólico à rede elétrica de média tensão. O sistema em análise é composto por uma turbina eólica de velocidade variável conectada diretamente a um gerador PMSG. A seguir, conecta-se o gerador ao conversor de potência do tipo *Back-to-Back*, representado pelo impedância *RL*, retificador de ponte completa controlado, barramento CC interno e um conversor do tipo fonte de tensão (VSC, do inglês: *Voltage Source Converter*) que, por sua vez, é conectado ao sistema elétrico de potência através do filtro *RL* passa-baixas.

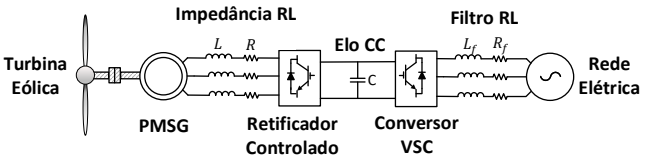


Figura 1. Esquemático elétrico da interconexão do sistema de geração eólica à rede de média tensão através do conversor de potência do tipo *Back-to-Back*.

2.1 Modelagem da Dinâmica do Vento

Faz-se necessário um modelo matemático que seja capaz de simular adequadamente as dinâmicas estocásticas presente no comportamento do vento, incluindo tanto o seu comportamento constante quanto suas variações na forma de rajadas, de rampas e de pertubações. Desta maneira, a modelagem do vento dá-se pela soma desses quatro componentes, dados em m/s, como mostrado em (1).

$$v_w(t) = v_b(t) + v_r(t) + v_g(t) + v_n(t), \tag{1}$$

onde v_b é o componente constante, base, do vento; v_r é a parcela referente as variações em rampa; v_g é o componente relativo às rajadas e v_n é o componente relacionado as pertubações. Maiores detalhes podem ser encontrados em Rolan et al. (2009).

Contudo, como o foco do presente trabalho é estudar estratégias de conexão da turbina eólica ao sistema elétrico de potência, considera-se que a dinâmica do vento é representada apenas pelo componente em degrau $v_b(t)$ descrito em (1).

2.2 Características da Turbina Eólica

A principal função da turbina eólica é a de transferir a energia cinética presente nos ventos para energia cinética de rotação, possibilitando assim, que tal recurso seja utilizado como fonte de energia primária no processo de conversão eletromecânica de energia. Desta maneira, em regime permanente, tanto a potência extraída quanto o torque mecânico aplicado ao eixo da turbina eólica são apresentados, respectivamente, em (2) e (3). (Errami et al., 2011).

$$P_m = \frac{1}{2}\rho C_p(\lambda,\beta)\pi R^2 v_w^3, \tag{2}$$

$$\tau_m = \frac{1}{2}\rho C_p(\lambda,\beta)\pi R^2 v_w^2, \tag{3}$$

onde ρ é a densidade do ar; C_p é o coeficiente de potência, β é o angulo de ataque das pás em relação ao plano de deslocamento do vento; v_w é a velocidade do vento e λ é a relação da velocidade de ponta das hélices e a velocidade do vento dada em (4), em que ω e R são a velocidade linear das pás e o raio da turbina.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w}, \tag{4}$$

Na Equação (5), é apresentado o conjunto de curvas que definem o coeficiente C_p.

$$C_p(\lambda,\beta) = 0,5176\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5\right)e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0,0068\lambda \tag{5}$$

onde o parâmetro λ_i, mostrado em (6), é uma função do tip speed λ e do angulo de ataque das hélices β. (Wu et al., 2011).

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \tag{6}$$

A partir deste cenário, tem-se que a condição de máxima extração de potência (MPPT, do inglês: *Maximum Power Point Tracking*) é definida pela escolha do parâmetro λ de tal forma que o coeficiente de potência C_p seja o maior possível. Na Figura 2 é mostrado a curva de performance da turbina eólica utilizada. Para isto, é realizada a variação do coeficiente λ em relação ao parâmetro C_p considerando que o angulo de ataque β é igual a zero.

2.3 Modelo do Gerador Síncrono de Imãs Permanentes - PMSG

Uma grande dificuldade na modelagem de máquinas elétricas, em coordenadas ABC, vem do fato de que o fluxo concatenado depende da posição angular do rotor no tempo, fazendo com que as equações que descrevem a dinâmica da tensão nos enrolamentos sejam diferenciais

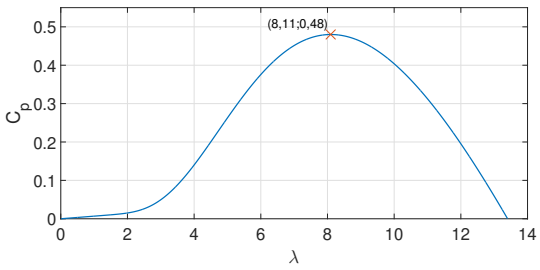


Figura 2. Curva de performance da turbina eólica.

com coeficientes periódicos, o que faz com que não exista solução analítica. Desta maneira, tanto para simplificar a modelagem da máquina elétrica como possibilitar uma solução analítica é utilizado a transformada de Park (Park, 1929, 1933).

Nas Equações (7) e (8), são apresentadas, em coordenadas síncronas, as equações fundamentais que relacionam as variáveis de tensão e corrente de um gerador PMSG (Krause et al., 2002).

$$v_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega L_s i_q \tag{7}$$

$$v_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega L_s i_d + \omega \phi_{mg} \tag{8}$$

onde v_d, v_q, i_d e i_q são, respectivamente, as tensões e correntes de eixo direto e de quadratura. Já R_s e L_s representa a impedância síncrona do gerador. Por fim, os parâmetros ϕ_{mg} e ω são, respectivamente, o fluxo permanente magnético e a velocidade de rotação síncrona do gerador.

As relações de torque mecânico e elétrico são apresentadas, respectivamente, em (9) e (10) (Wang et al., 2015).

$$\tau_m = \tau_e - J\frac{d\omega_m}{dt} - B\omega_m \tag{9}$$

$$\tau_e = \frac{3}{2} Z_p \left(\phi_{mg} i_q + (L_d - L_q)\, i_d i_q\right) \tag{10}$$

onde τ_e e τ_m são, respectivamente, o torque elétrico e mecânico da máquina. Os coeficientes de inércia e amortecimento da rotação são representados por J e B, respectivamente. Já as indutâncias de eixo direto e quadratura são descritas por Ld e Lq, na devida ordem. O número de par de polos é representado por Z_p.

Para garantir que a implementação da mudança de referêncial seja realizada de maneira correta, optou-se pela utilização do circuito de sincronismo DSOGI-PLL (Rodriguez et al., 2006).

2.4 Modelo do Barramento CC

Para garantir o correto balanço energético, entre a potência enviada ao barramento CC (P_g) pelo gerador PMSG e a potência injetada na rede (P_i) pelo conversor VSC, faz se necessário manter o nível de carga do capacitor C constante. Desta maneira, o modelo da dinâmica da potência do elo CC utilizado é apresentado em (11) (Yazdani and Iravani, 2010).

$$P_{cc} = \frac{C}{2}\frac{dv_{cc}^2}{dt} \tag{11}$$

2.5 Modelo da Rede Elétrica

A interconexão do sistema de geração eólico à rede elétrica de média tensão é feita através do filtro RL passa-baixas. O principal intuito da utilização desse filtro é mitigar os componentes harmônicos de alta frequência do conjunto de corrente trifásicas provenientes do chaveamento do conversor VSC. Dessa maneira, em (12) e (13) é apresentado o modelo da conexão do conversor à rede elétrica (Almeida et al., 2015).

$$v_{c\alpha} = R_f i_\alpha + L_f \frac{di_\alpha}{dt} + v_\alpha \tag{12}$$

$$v_{c\beta} = R_f i_\beta + L_f \frac{di_\beta}{dt} + v_\beta \tag{13}$$

onde v_α, v_β, i_α e i_β representam o conjunto de tensões e correntes no ponto de acoplamento comum em coordenadas estacionárias, enquanto o conjunto de tensões de saída do conversor VSC é representado por $v_{c\alpha}$ e $v_{c\beta}$. Por fim, os parâmetros do filtro de saída do conversor são descritos pelo resistor R_f e pelo indutor L_f.

Segundo Akagi et al. (2017), no espaço vetorial de coordenadas ortogonais $\alpha\beta$, tanto a potência real instantânea (p) quanto a potência imaginária instantânea (q) podem ser definidas por (14) e (15).

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \tag{14}$$

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{pmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} \tag{15}$$

Optou-se pela modelagem matemática da conexão do inversor ao sistema elétrico de potência em coordenadas $\alpha\beta$ uma vez que, diferentemente da implementação da modelagem em coordenada síncrona, não há a necessidade do uso de nenhuma técnica de sincronização entre o conversor de eletrônica de potência e à rede.

3. SISTEMA DE CONTROLE

Na Figura 3 é mostrado em detalhes a estratégia de controle adotada. Para simplificar a metodologia utilizada, este tópico será dividido em duas subseções: controle do lado do gerador e da rede.

3.1 Controle do lado do Gerador

A partir da condição de máxima potência obtida pelo MPPT defini-se a velocidade angular de referência (w_m^*) para ser comparada com a velocidade medida no eixo de rotação da máquina (ω_m). Através da ação do controlador proporcional integral ($PI_{qw}(s)$), o erro da velocidade angular é transformada em referência de corrente (i_q^*) que,

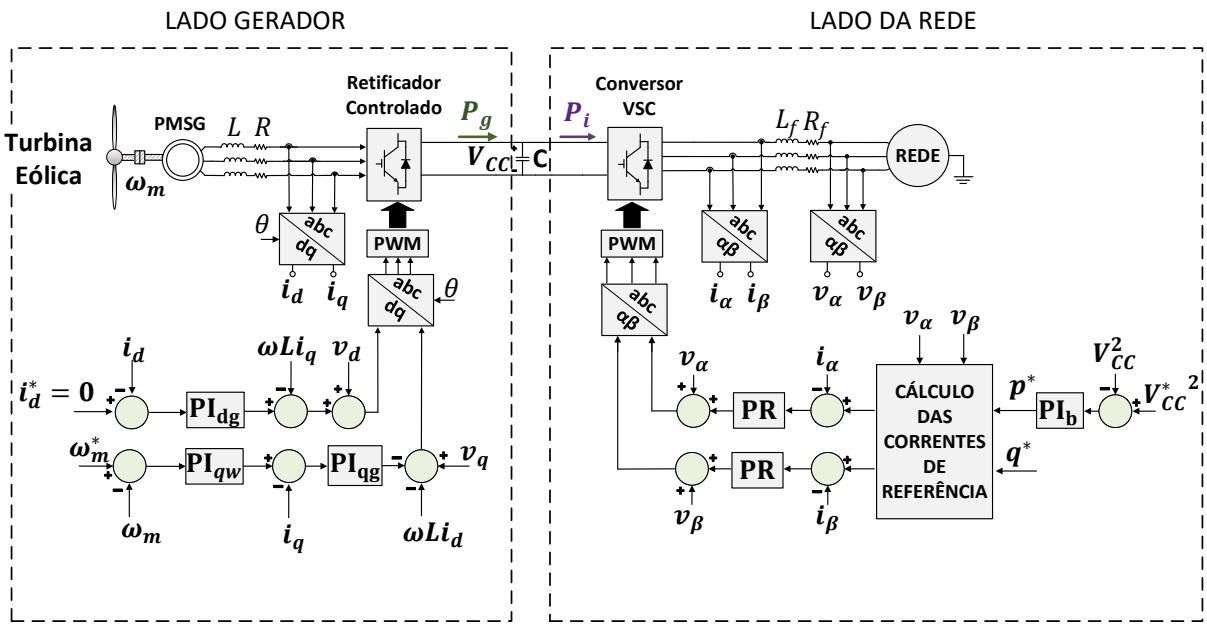


Figura 3. Detalhes da estratégia de controle adotada.

por sua vez, é utilizado na malha interna de controle de corrente do gerador síncrono (Wang et al., 2015).

Contudo, para garantir a correta operação do retificador controlado tanto para drenar o nível adequado das correntes trifásicas quanto na atuação do controle de torque eletromagnético do gerador síncrono (τ_e), faz se com que, no sistema de referencial síncrono, a corrente de eixo direto (i_d) seja mantida em seu valor nulo. Impondo assim, o acoplamento entre as dinâmicas do vetor espacial de corrente e a componente de eixo de quadratura da corrente (i_q).

Na Equação (16), é apresentada a relação entre a corrente de quadratura e o torque eletromagnético induzido pelo gerador (Wang et al., 2015).

$$i_q = \frac{2\tau_e}{3Z_p\phi_{mg}} \tag{16}$$

No controle de corrente do gerador também são utilizados os compensadores proporcional integral ($PI_{qg}(s)$ e $PI_{dg}(s)$). Para o projeto dos controladores é utilizada a técnica de alocação de polos, onde o polo da planta é substituído por outro mais rápido (Santos, 2015a).

Por fim, faz-se o desacoplamento entre as malhas de corrente, com o intuito de garantir que o controle tanto de ramo direto quanto o de quadratura atuem de maneira independentes entre si.

3.2 Controle do lado da Rede

Para manter o correto nível de carga sobre o capacitor C do barramento CC é projetado um controlador $PI_b(s)$ através da técnica de alocação dos polos em malha fechada (Soares et al., 2012). Os parâmetros de $PI_b(s)$ estão apresentados na Tabela 1.

A referência de potência ativa instantânea (p^*), é transformada em referência de corrente através de (15). Dessa maneira, para garantir que um conjunto de correntes trifásicas senoidais sejam injetados a rede elétrica, é projetado um controlador proporcional-ressonante. Em (17) é mostrado a função de transferência do controlador.

$$PR(s) = kp_r + \frac{ki_r}{s^2 + w_0^2} \tag{17}$$

Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros de projeto do controlador $PR(s)$. Para análise de estabilidade do sistema de controle proposto é ilustrado na Figura 4 o diagrama de Nyquist de $PR(s)G(s)$, onde $G(s)$ é a função de transferência do conversor VSC conectado a rede elétrica. Segundo Astrom and Murray (2008), o sistema projetado é estável pois apresenta vetor de margem η igual a 0,7.

Tabela 1. Parâmetros dos controladores utilizados.

PI_w - Controle de Velocidade	
(kp_q) ganho proporcional	$3,61A.s/rad$
(ki_q) ganho integral	$23,65A/rad$
PI_g - Controle de Corrente do Gerador	
(kp_g) ganho proporcional	$10V/A$
(ki_g) ganho integral	$0,0075V/(A.s)$
PI_b - Controle do Barramento CC	
(kp_b) ganho proporcional	$-0,4398A/V$
(ki_b) ganho integral	$-39,4784A/(V.s)$
PR - Controlador Proporcional Ressonante	
(kp_r) ganho proporcional	$0,5V/A$
(ki_r) ganho integral	$1000V/(A.s)$
(w_0) frequência natural de oscilação	$377rad/s$

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A seguir, os resultados obtidos da interconexão do sistema de geração eólico à rede elétrica de média tensão são apresentados. Para isso, foi utilizado o ambiente de simulações de circuitos elétricos PSIM com passo de simulação igual a 1 μs.

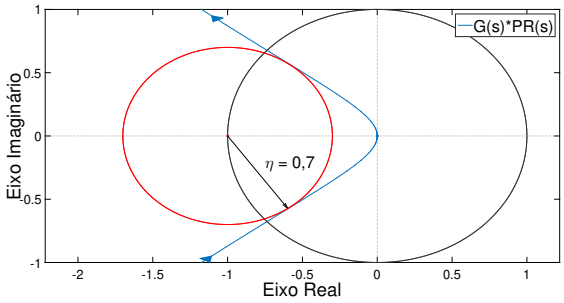


Figura 4. Diagrama de Nyquist de $PR(s)G(s)$.

Os principais parâmetros utilizados no ambiente de simulação são listados na Tabela 2. Para avaliação do sistema foi utilizado o perfil de vento exposto na Figura 5.

Tabela 2. Parâmetros de simulação.

Turbina Eólica	
Potência nominal	$2MW$
Diâmetro do rotor	$32,5m$
Área coberta pelo rotor	$3318,3m^2$
Velocidade base de rotação	$10RPM$
Velocidade inicial de rotação	$6RPM$
Velocidade base do vento	$10m/s$
Momento de inercia	$80kgm^2$
Gerador PMSG	
Potência nominal	$2MW$
Tensão L-L	$1,2kV$
(R_s) resistência do estator	$0.821m\Omega$
(L_d) indutância de eixo direto	$1.5731mH$
(L_q) indutância de eixo em quadradura	$1.5731mH$
$V_{pk}/krpm$	$5000VkRPM^{-1}$
(Z_p) numero de par de polos	13
Impedância RL	
(R) resistência	$0,02\Omega$
(L) indutância	$1,5mH$
Barramento CC	
(C) capacitância	$5mF$
Tensão do barramento	$2kV$
Filtro RL	
(R_f) resistência	$0,33\Omega$
(L_f) indutância	$1mH$
Frequência de Chaveamento	$5kHz$
Sistema Elétrico	
Tensão L-L	$690V$
Frequência	$60Hz$

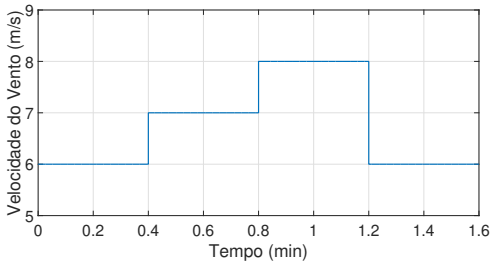
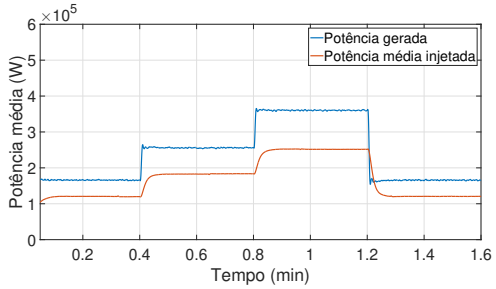
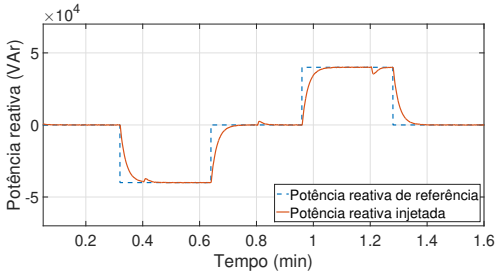


Figura 5. Dinâmica do vento.

Na Figura 6 são apresentadas a dinâmica da potência gerada e da potência injetada na rede. Devido as perdas ôhmicas, pertinentes a normal operação do conjunto, nota-se que, a potência injetada pelo conversor VSC à rede é menor que a potência gerada pelo PMSG, Figura 6(a). Já na Figura 6(b) é mostrada a capacidade da troca de potência reativa entre o conjunto de geração proposto e o sistema elétrico de potência.



(a)



(b)

Figura 6. Dinâmica da potência (a) média gerada e invetada ; (b) reativa trocada com à rede.

A Figura 7, apresenta o correto rastreamento da velocidade de referência pelo gerador, permitindo desta maneira, que a turbina eólica atue de forma adequada no ponto de máxima extração de potência.

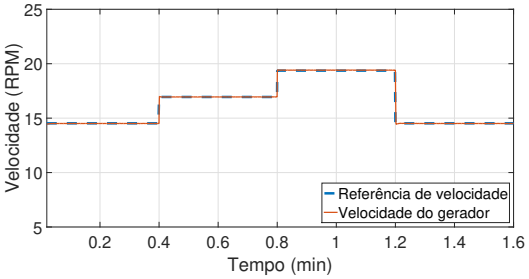


Figura 7. Rastreamento da velocidade de referência pelo PMSG.

O comportamento do nível de carregamento do capacitor C do conversor Back-to-Back é apresentado na Figura 8. Variações de tensões no barramento são relacionadas principalmente a dinâmica da potência extraída do gerador PMSG. Destaca-se que, a máxima variação absoluta da tensão no barramento foi de $2,5\%$ e ocorre no tempo t igual a 1,2 minutos.

Na Figura 9(a) é apresentado a síntese de correntes trifásicas senoidais injetadas no PAC através do conversor VSC, utilizando o sistema de controle proposto. Na Figura 9(b) é mostrado em detalhe o comportamento da dinâmica das correntes trifásicas sintetizadas. Nota-se que, mesmo com a variação do perfil do vento, o sistema de controle proposto é capaz de sintetizar correntes trifásicas com um perfil de onda senoidal.

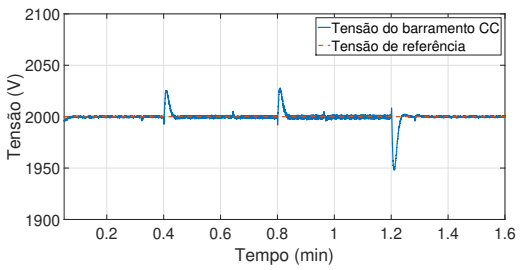
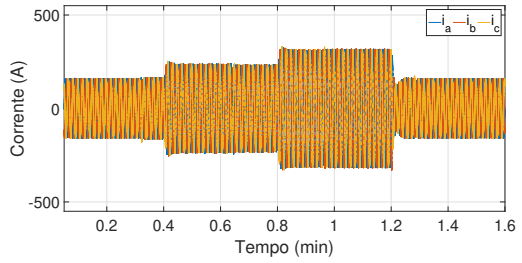
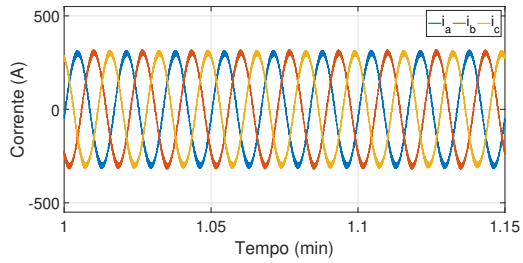


Figura 8. Tensão no barramento CC.



(a)



(b)

Figura 9. (a) conjunto de correntes trifásicas injetadas no sistema elétrico de potência e (b) detalhe das correntes trifásicas sintetizadas pelo conversor VSC.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho dissertou sobre uma possível estratégia de controle que possibilita a interconexão da geração eólica ao sistema elétrico de potência através de um conversor *Back-to-Back*. Para este fim, foi utilizado a técnica de rastreamento de máxima potência garantindo assim, a máxima extração de energia possível da fonte primária. E em seguida, para transmitir toda a potência gerada adequadamente para o sistema elétrico de potência, projetou-se o conversor VSC de maneira a garantir o correto balanço energético sobre o elemento armazenador de energia do barramento CC.

Através dos resultados obtidos, conclui-se que a estratégia adotada mostra-se eficaz ao se tratar da interconexão da geração eólica à rede elétrica de baixa tensão.

Como trabalhos futuros, os autores sugerem a implementação de um conversor *Back-to-Back* multinível; propor uma estratégia para o controle do angulo de ataque das pás (β) de maneira a regular o nível de estresse mecânico no conjunto gerador e, por fim, estudar a interconexão de sistemas de armazenamento de energia com o sistema de geração eólico.

REFERÊNCIAS

Akagi, H., Watanabe, E.H., and Aredes, M. (2017). *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. John Wiley & Sons.

Almeida, P.M., Barbosa, P.G., Oliveira, J.G., Duarte, J.L., and Ribeiro, P.F. (2015). Digital proportional multiresonant current controller for improving grid-connected photovoltaic systems. *Renewable Energy*, 76, 662–669.

Astrom, K.J. and Murray, R.M. (2008). Feedback systems. In *An introduction for Scientists and Engineers*, 275. Princeton Unvirsity Press.

Blaabjerg, F., Iov, F., Kerekes, T., Teodorescu, R., and Ma, K. (2011). Power electronics-key technology for renewable energy systems. In *2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, 445–466. IEEE.

Errami, Y., Maaroufi, M., and Ouassaid, M. (2011). Modelling and control strategy of pmsg based variable speed wind energy conversion system. In *2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems*, 1–6. IEEE.

Karnauskas, K.B., Lundquist, J.K., and Zhang, L. (2018). Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. *Nature Geoscience*, 11(1), 38–43.

Krause, P.C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S.D., and Pekarek, S. (2002). *Analysis of electric machinery and drive systems*, volume 2. Wiley Online Library.

Li, W., Abbey, C., and Joós, G. (2006). Control and performance of wind turbine generators based on permanent magnet synchronous machines feeding a diode rectifier. In *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1–6. IEEE.

Oliveira, C.d.C. et al. (2019). An'alise do potencial e'olico na regi ao nordeste do brasil e sua evoluç ao na participaç ao da matriz el'etrica nacional.

Ortiz, G. and Kampel, M. (2011). Potencial de energia e'olica offshore na margem do brasil. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. V simp'osio Brasileiro de Oceanografia, Santos*.

Park, R. (1933). Two-reaction theory of synchronous machines-ii. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 52(2), 352–354.

Park, R.H. (1929). Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48(3), 716–727.

Rodriguez, P., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A., Liserre, M., and Blaabjerg, F. (2006). New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. In *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC 37th IEEE*, 1–7.

Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G., Aguilar, D., and Azevedo, G. (2009). Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. In *2009 IEEE international symposium on industrial electronics*, 734–739. IEEE.

Saidur, R., Islam, M., Rahim, N., and Solangi, K. (2010). A review on global wind energy policy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(7), 1744–1762.

Santos, G.V. (2015a). *Sistemas de Controle Aplicado a Aerogeradores Síncronos com Conversor Back-to-Back*.

Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais - Brasil.

Santos, G.V. (2015b). *Sistemas de controle aplicados a aerogeradores síncronos com conversores Back-to-Back*. Ph.D. thesis.

Soares, L.T., Pimenta, C.M., Junior, S.I., and Silva, S.R. (2012). Modelagem e controle de um conversor back-to-back para aplicação em geração de energia eólica. *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. SBA*, 1–6.

Teodorescu, R., Liserre, M., and Rodriguez, P. (2011). *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*, volume 29. John Wiley & Sons.

Wang, L., Chai, S., Yoo, D., Gan, L., and Ng, K. (2015). *PID and predictive control of electrical drives and power converters using MATLAB/Simulink*. John Wiley & Sons.

Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., and Kouro, S. (2011). *Power conversion and control of wind energy systems*, volume 76. John Wiley & Sons.

Yazdani, A. and Iravani, R. (2010). *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. John Wiley & Sons.