

PROJETO E SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA BASEADO EM UM PMSG CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO

SAMUEL N. DUARTE, PEDRO G. BARBOSA, JANAÍNA G. DE OLIVEIRA*

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, MG, 36036-900 Brasil*

Email: samuel.neves@engenharia.ufjf.br, pedro.gomes@ufjf.edu.br,
janaina.oliveira@ufjf.edu.br

Abstract— This paper presents the control system design steps of a wind power generation system based on a permanent magnet generator (PMSG) connected to the electric network through a two-stage converter. The converters on the generator and network sides are controlled to regulate the DC bus voltage, as well as to control the permanent magnet generator speed in order to keep the optimum tip of the wind turbine for the whole wind speed range. The grid-side converter can also be controlled to synthesize reactive power on its terminals emulating the behavior of a static synchronous compensator. In this case, the generation system can still be used even when there is no wind enough to generate electricity. The entire system was modeled and simulated in the PSIM software using an didactic approach and description that can be very useful in the study and teaching of wind power systems. In order to validate the controllers performance, real wind speed data were used to analyze the system behavior in situations when the wind and the active power supplied by the generator vary.

Keywords— Permanent magnet synchronous generator, back-to-back converter, wind energy.

Resumo— Este trabalho apresenta as etapas de projeto dos controladores de um sistema de geração eólica baseado em um gerador de ímãs permanentes (PMSG), conectado à rede elétrica através de um conversor de dois estágios. Os conversores do lado do gerador e do lado da rede são controlados para regular a tensão do barramento CC do conversor *back-to-back*, bem como controlar a velocidade do gerador de ímãs permanentes a fim de manter o *tip* ótimo da turbina eólica, para toda a faixa de variação de velocidades do vento. O conversor do lado da rede elétrica pode ainda ser controlado para sintetizar potência reativa em seus terminais emulando o comportamento de um compensador estático síncrono. Neste caso, o sistema de geração pode ainda ser utilizado mesmo quando não há vento suficiente para extrair energia do vento. Todo o sistema foi modelado e simulado no *software* PSIM utilizando uma abordagem e descrição bastante didática que pode ser bastante útil no estudo e ensino de sistemas de geração eólica. Para validar o desempenho dos controladores foram utilizados dados reais de velocidade do vento para uma análise do comportamento do sistema frente as variações do vento e na potência ativa fornecida pelo gerador.

Palavras-chave— Gerador de ímãs permanentes, conversor *back-to-back*, energia eólica.

1 Introdução

O aumento do consumo de energia elétrica, associado a elevação dos custos de recursos não renováveis usados para geração de eletricidade, têm sido fatores responsáveis pela busca e desenvolvimento de sistemas elétricos mais eficientes (Huang et al., 2014). Na busca por novas soluções e alinhado com as mudanças nos cenários regulatório e econômico dos setores energéticos, tem-se observado uma expansão dos sistemas de geração distribuídos (SGD) conectados nas redes elétricas de distribuição. Estes SGD apresentam a vantagem adicional de minimizar o impacto ambiental associado a geração de energia quando são baseados em fontes de energia renováveis, como por exemplo, a energia eólica. Nesse sentido, os sistemas de geração eólicos produzem uma energia de um baixo custo e reduzido impacto ambiental (Richardson and McNerney, 1993).

As máquinas síncronas de ímãs permanentes (do inglês, *Permanent Magnet Synchronous Machines*) (PMSM) têm ganhado destaque nos últimos anos em aplicações como geração eólica, aci-

onamento de veículos elétricos entre outros (Valle et al., 2015). O alto fator de potência, a elevada eficiência, baixo peso e o volume reduzido são algumas das principais vantagens das PMSM. Por outro lado esses motores apresentam a desvantagem da amplitude da tensão e a frequência de saída do gerador variarem proporcionalmente a velocidade mecânica do eixo do mesmo. Assim, para conectar esse gerador à uma rede elétrica ou alimentar cargas com frequência constante deve-se utilizar um conversor de interface, numa topologia *back-to-back* (Huang et al., 2014).

Deste modo, o principal objetivo deste trabalho é apresentar as etapas de projeto dos controladores de um gerador eólico de ímãs permanentes (PMSG), conectado a uma rede elétrica através de um conversor eletrônico de potência de dois estágios. Todo o sistema será modelado e simulado no *software* PSIM com descrições e abordagens bastante didáticas. Para validar o desempenho dos controladores serão utilizados dados reais de um dia, da velocidade do vento, obtido pelo Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) do Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais (INPE).

2 Descrição do Sistema Modelado

Na Figura 1 é mostrado o sistema de geração eólico baseado em um PMSG conectado à rede elétrica através de um conversor de dois estágios juntamente com os diagramas de blocos de seus controladores.

O conversor do lado do PMSG controla a potência convertida pela turbina eólica regulando a velocidade mecânica do eixo enquanto o conversor do lado da rede regula a tensão do barramento CC injetando a potência ativa proveniente do gerador. Este segundo conversor pode ainda atuar como um DSTATCOM (do inglês, *Distribution Static Synchronous Compensator*) compensando a potência reativa da rede elétrica. Tanto o retificador quanto o inversor foram modelados como conversores trifásicos em ponte completa, com tensão de saída com dois níveis e uma frequência de chaveamento de 25 kHz.

A rede elétrica foi modelada por uma fonte trifásica de 380 volts eficazes na frequência (f_s) de 60 hertz, conectada em série com uma resistência R_s e uma reatância indutiva $X_s = \omega_s L_s$, sendo $\omega_s = (2\pi f_s)$, $R_s = 0,2 \Omega$ e $L_s = 100 \mu\text{H}$.

2.1 Filtros de conexão do conversor de dois estágios

Filtros passivos são conectados nos terminais do retificador e inversor do conversor *back-to-back* da Figura 1 para minimizar os harmônicos de chaveamento gerados pela operação dos mesmos.

Na Figura 2 (a) é mostrado a topologia do filtro de segunda ordem usado como circuito de interface entre o inversor e a rede elétrica de distribuição. Nessa figura R_{eqs} representa a resistência do indutor L_{fs} somada a resistência dos interruptores semicondutores do inversor, cujos valores são $3,3 \text{ m}\Omega$ e $1,5 \text{ mH}$ respectivamente. Já a resistência R_{fs} de $1 \text{ m}\Omega$ representa a resistência equivalente série do capacitor C_{fs} de $2,7 \mu\text{F}$. O valor da capacitância do filtro foi escolhido de maneira que a frequência de corte fosse 2,5 kHz, ou seja, uma década abaixo da frequência de chaveamento do inversor.

Na Figura 2 (b) é mostrado a topologia do filtro usado como circuito de interface entre o PMSG e o retificador do conversor *back-to-back*. Como no modelo anterior, R_{eqg} representa a resistência do indutor L_{fg} somada a resistência equivalente de condução dos interruptores semicondutores do retificador. Os valores destes elementos são $10,5 \text{ m}\Omega$ e 6 mH , respectivamente.

2.2 A Turbina Eólica e o PMSG

A turbina eólica é conectada ao eixo do PMSG através de uma caixa de engrenagens cuja relação

de transformação é R_{eng} . Além desse parâmetro, a turbina é caracterizada por sua potência nominal (P_t), velocidade do vento base (v_{bw}), velocidade angular base da turbina (ω_{bt}), coeficiente de potência ótimo (C_p) e sua relação de velocidades ótima (Tip). Os valores desses parâmetros são dados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da turbina eólica.

Grandeza	Valor
P_t	34 kW
v_{bw}	20 m/s
ω_{bt}	30 rpm
Tip	8,18
C_p	0,49
R_{eng}	30:3000

O PMSG foi modelado como um gerador síncrono de ímãs permanentes, com um perfil de *fem* induzida senoidal, cujos principais parâmetros são dados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do gerador.

Grandeza	Valor
P_g	34,87 kW
V_g	380 V
ω_g	3000 rpm
R_g	$0,05 \Omega/\text{fase}$
L_{dq}	$635 \mu\text{H}/\text{fase}$
J	$0,011 \text{ kg.m}^2$
F	$0,001889 \text{ N.m.s}$

2.3 Dados da velocidade do vento

O perfil de velocidade do vento foi obtido do sistema SONDA/INPE sendo que o local escolhido para a utilização dos dados foi a cidade de Triunfo, PE, cuja altitude é 1.123 metros. Os dados foram coletados no mês de julho de 2004 a uma altura de 50 metros do nível do solo, com uma periodicidade de medição de 10 minutos. Foram utilizados 140 medições de velocidade do vento, das 04:20 do dia 23 até as 03:30 do dia 24. Vale ressaltar que estes dados de vento foram validados através de uma estratégia de controle de qualidade baseada na técnica BSRN (do inglês, *Baseline Surface Radiation Network*) (Project, 2016).

3 A Estratégia de Controle Utilizada

Os controladores de corrente do retificador e inversor, do conversor de interface, foram implementados no sistema de coordenadas síncrono *dq*. Essa estratégia tem a vantagem de permitir o uso de controladores proporcional-integral (PI) evitando a necessidade da utilização de controladores ressonantes. Contudo é necessário utilizar

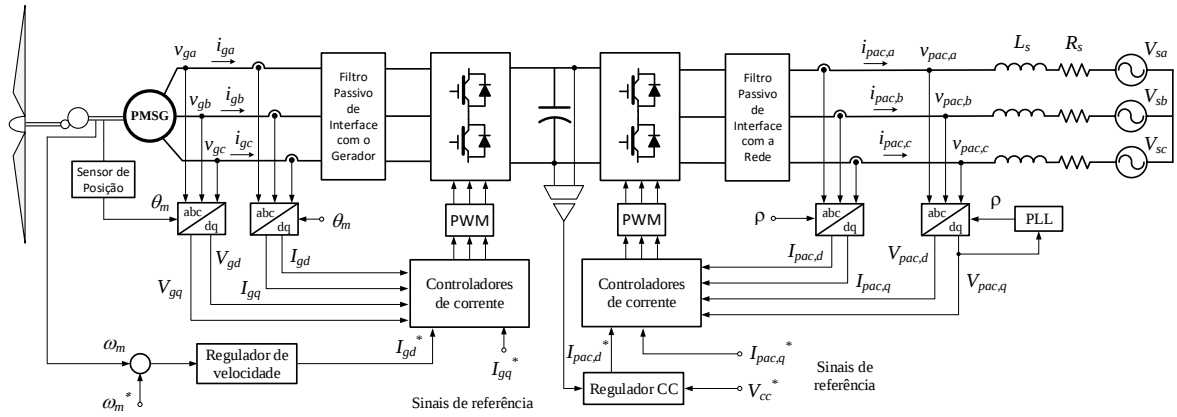


Figura 1: Sistema de geração eólico baseado em gerador síncrono de ímãs permanentes conectado à rede elétrica através de um conversor de dois estágios.

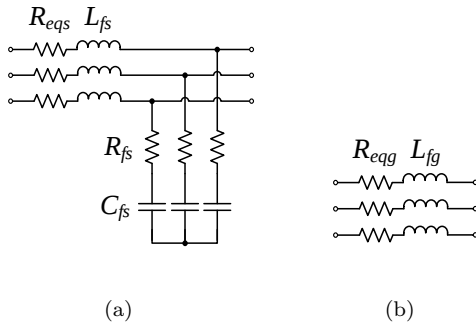


Figura 2: Topologias dos circuitos de interface: (a) Filtro passivo de segunda ordem, (b) filtro passivo de primeira ordem.

circuitos de sincronismo (do inglês, *Phase Locked Loop*) (PLL) e sensores de posição para garantir o correto funcionamento dos controladores.

3.1 Controle da tensão do barramento CC

Na Figura 3 é mostrado o diagrama de blocos do controlador da tensão do barramento CC do conversor *back-to-back*. O erro entre a tensão do barramento CC e uma tensão referência, neste caso 800 (V), alimenta um controlador PI cuja saída é um sinal de referência, proporcional a potência ativa (P_{pac}^*), usado para controlar o inversor do lado da rede CA através da corrente de eixo direto ($I_{pac,d}^*$).

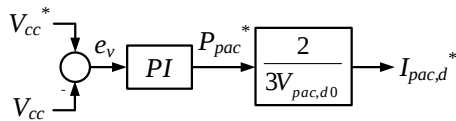


Figura 3: Diagrama de blocos da malha externa de controle de tensão.

3.2 Controle da potência reativa

A corrente de eixo em quadratura de referência do lado da rede, para se realizar o controle da potência reativa entre o inversor e a rede quando necessário, é calculada da seguinte maneira:

$$I_{pac,q}^* = - \left(\frac{2Q_{pac}^*}{3V_{pac,d0}} \right) \quad (1)$$

onde Q_{pac}^* é a potência reativa de referência e $V_{pac,d0}$ é a tensão de pico nominal do ponto de acoplamento comum (PAC).

3.3 Controle de velocidade

A turbina do sistema de geração eólico tem um passo fixo. Desse modo, o controle de velocidade do gerador utiliza a estratégia de *optimal tip speed ratio* para extrair a máxima potência (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*) (MPPT) da turbina eólica. Este método permite manter a máxima transferência de potência do vento para as pás da turbina regulando a velocidade de rotação do gerador em função da variação da velocidade do vento.

De acordo com (Wu et al., 2011), a velocidade de referência do gerador ω_m^* (rpm) pode ser calculada por:

$$\omega_m^* = \frac{\lambda v_w}{r} \quad (2)$$

onde λ é o *tip speed ratio*, r é o raio das pás da turbina em (m) e v_w é a velocidade do vento em (m/s).

Na Figura 4 é mostrado o diagrama de blocos, baseado em (2), responsável pela geração do sinal de referência I_{gd}^* .

3.4 Controladores de corrente

Na Figura 5 são mostradas as malhas de controle de corrente usadas para gerar os índices ou

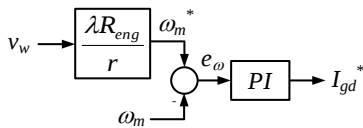


Figura 4: Diagrama de blocos da malha externa de controle da velocidade do gerador.

fatores de modulação m_{sd} e m_{sq} , utilizados para gerar os sinais PWM (*Pulse Width Modulation*) necessários para acionar o conversor do lado da rede.

Já na Figura 6 são mostrados os diagramas de bloco das malhas de controle de corrente do retificador, ou seja, o conversor do lado do PMSG.

Enquanto na malha de corrente do inversor é usada uma estratégia para desacoplar os sinais de controle de eixo direto e em quadratura, no retificador, devido a característica do gerador de ímãs permanentes, esta estratégia de desacoplamento não é necessária de ser utilizada.

Além dos sinais de desacoplamento são também utilizadas malhas *feed-forward*, nas quais as tensões de eixo direto e quadratura do PAC são filtradas e somadas ao sinal de erro de saída dos controladores de corrente conforme mostrado nas Figuras 5 e 6 (Yazdani and Iravani, 2010). Essas malhas *feed-forward* melhoram a resposta dinâmica do sistema fazendo que os controladores de corrente dos conversores fiquem imunes a variações da tensão do PAC. As frequências de corte dos filtros do lado da rede e do lado do gerador são 500 e 420 Hz, respectivamente.

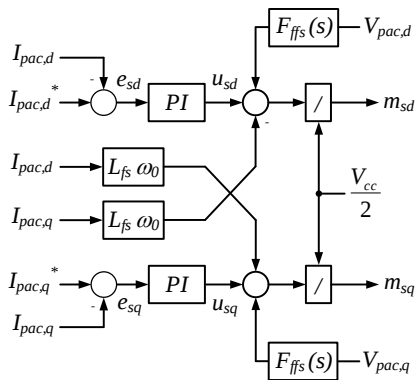


Figura 5: Diagrama de blocos da malha de corrente do lado da rede.

3.5 Circuito de sincronismo

Na Figura 7 é mostrado o diagrama de blocos do circuito de sincronismo (do inglês, *Phase Locked Loop*) (PLL) usado para detectar a fase e a frequência da rede necessários para realizar as transformações de coordenadas das tensões e

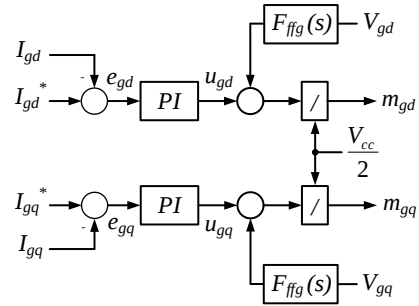


Figura 6: Diagrama de blocos da malha de corrente do lado do gerador.

correntes do lado do inversor, de *abc* para *dq* e vice-versa, garantindo o correto funcionamento dos controladores projetados.

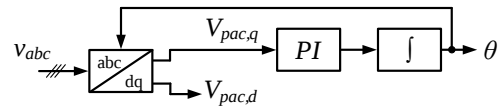


Figura 7: Diagrama de blocos do circuito de sincronismo (PLL) implementado.

Do lado do retificador usa-se um sinal do sensor de posição do PMSG para obter esse ângulo usado nas transformações de coordenadas.

4 Projeto dos controladores

Nesta seção os parâmetros dos controladores do sistema de geração eólica são projetados a partir de equações que descrevem o sistema e da escolha das frequências naturais (ω_n) e amortecimentos das malhas de controle (ξ).

4.1 Circuito de sincronismo

Escrevendo as equações de malha fechada do PLL mostrado na Figura 7 e comparando com a forma canônica da função de transferência de segunda ordem chega-se as seguintes relações para determinar as constantes do controlador:

$$K_{pPLL} = \frac{2\xi\omega_n}{V_{pac,d0}} \quad (3)$$

$$\tau_{PLL} = \frac{K_{pPLL} V_{pac,d0}}{\omega_n^2} \quad (4)$$

onde K_{pPLL} é o ganho proporcional do controlador, τ_{PLL} é a constante de tempo do controlador e $V_{pac,d0}$ é o valor de pico nominal da tensão do PAC.

No projeto do PLL os valores de ω_n e ξ usados para determinar os valores de K_{pPLL} e τ_{PLL} foram 104,72 rad/s e $\sqrt{2}$, respectivamente.

4.2 Controladores das malhas de corrente

Para regular as correntes de eixo direto e quadratura são usados dois controladores PI. As constantes destes reguladores são calculadas pelas expressões a seguir:

$$K_{p_i} = \frac{L_f}{\tau_i} \quad (5)$$

$$K_{i_i} = \frac{R_{eq}}{\tau_i} \quad (6)$$

onde K_{p_i} é o ganho proporcional do controlador, K_{i_i} é o ganho integral do controlador, L_f é a indutância do filtro de acoplamento, R_{eq} é a soma da resistência de condução dos IGBT's e do filtro, e τ_i é a constante de tempo desejada para malha de corrente. Tanto no inversor quanto no retificador τ_i foi projetado com um valor de 0,1 ms.

4.3 Controlador da malha externa de tensão

Os ganhos proporcional e integral do controlador PI da malha externa de tensão, de acordo com (de Almeida et al., 2012), são calculados como se segue,

$$K_{p_v} = \frac{2\xi\omega_n C}{3V_{pac,d0}} \quad (7)$$

$$K_{i_v} = \frac{\omega_n^2 C}{3V_{pac,d0}} \quad (8)$$

onde K_{p_v} é o ganho proporcional do controlador de tensão, K_{i_v} é o ganho integral do controlador de tensão, C é a capacitância do barramento CC, e $V_{pac,d0}$ é a tensão de pico nominal do PAC. Os valores de projeto escolhidos para ω_n e ξ foram 125,66 rad/s e 1,1 respectivamente.

4.4 Controlador da malha externa de velocidade

O fluxo de um gerador de ímãs permanentes é encontrado por (9) de acordo com (Donsión, 2007). Assim, os ganhos proporcional e integral da malha de velocidade são calculados por (10) e (11) respectivamente:

$$\psi = \frac{60(V_{pk}/K_{rpm})}{\sqrt{3}\pi N_p 1000} \quad (9)$$

$$K_{p_\omega} = \frac{8\xi\omega_n J}{3N_p \psi} \quad (10)$$

$$K_{i_\omega} = \frac{4\omega_n^2 J}{3N_p \psi} \quad (11)$$

onde K_{p_ω} é o ganho proporcional, K_{i_ω} é o ganho integral, J é o momento de inércia do gerador, N_p é o número de polos do gerador e ψ é o fluxo do gerador. O valor de projeto escolhido para ω_n foi 31,416 rad/s, já o valor escolhido para ξ foi 1,3.

5 Resultados

Neste trabalho foram realizadas duas simulações. Na primeira é apresentado o desempenho dos controles projetados quando estes são ligados. Na segunda simulação foram utilizados os dados reais da velocidade do vento para a validação dos controladores projetados.

5.1 Desempenho dos controladores durante a inicialização do sistema de controle

Na Figura 8 (a) é mostrado a tensão do barramento CC quando o mesmo é ligado (0,4 s). Pode-se observar nessa figura que o controlador PI projetado consegue regular a tensão CC dos conversores mantendo esta tensão no valor de referência durante toda a simulação. Na Figura 8 (b) é mostrado o perfil de vento que foi aplicado na turbina eólica para verificar a capacidade do sistema de controle de velocidade em rastrear um sinal com característica de uma rampa. Na Figura 8 (c) é mostrado que a velocidade do gerador/turbina foi capaz de acompanhar o perfil de vento apresentado na Figura 8 (b) além de mostrar o desempenho do controle de velocidade quando o mesmo é ligado (0,8 s). Finalmente, na Figura 8 (d) mostra-se a potência ativa que flui do PMSG para o conversor durante o intervalo de tempo em que a velocidade do vento foi variada.

5.2 Desempenho dos controladores para dados reais de vento

Devido a alta frequência de chaveamento do conversor e consequentemente o pequeno passo de simulação utilizado, o tempo necessário para simular o sistema pode se tornar muito elevado em função do tempo que se quer simular. Deste modo as 140 medições da velocidade do vento utilizadas neste trabalho foram escaladas de maneira a permitir a simulação de um dia de vento em alguns segundos através de uma compressão dos dados medidos.

Nas Figuras 9 (a), (b) e (c) são mostrados o perfil de vento utilizado para testar o PMSG e validar o desempenho dos controladores projetados, a velocidade mecânica do eixo e a potência ativa nos terminais de saída do PMSG, respectivamente. A análise dos resultados mostra que o sistema de controle de velocidade garante a máxima transferência de potência do vento para as pás da turbina eólica através da variação da velocidade do PMSG em função da variação do vento.

6 Conclusão

Neste trabalho os cálculos necessários para o desenvolvimento do projeto dos controladores de um sistema de geração eólica baseado em um gerador de ímãs permanentes foram apresentados de-

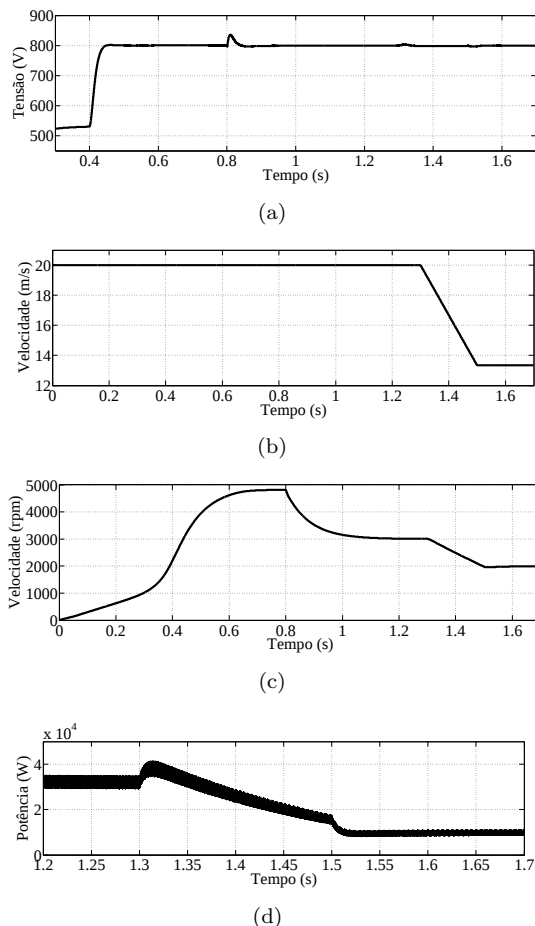


Figura 8: Resultados da simulação: (a) Tensão do barramento CC, (b) velocidade do vento, (c) velocidade do gerador e (d) potência ativa do gerador.

talhadamente de forma didática, permitindo reprodução dos resultados.

Para validação dos controladores projetados o sistema foi simulado no *software* PSIM utilizando dados reais da velocidade do vento. Como foi realizada uma compressão dos dados de vento, resultando em uma grande variação da velocidade do vento em um tempo muito pequeno, ficou comprovada a capacidade do sistema de geração e controle de acompanhar a velocidade do vento para manter o *tip* ótimo, mesmo em situações extremas de vento.

7 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o CNPq, a CAPES, a FAPEMIG e a UFJF pelo apoio financeiro e bolsas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

de Almeida, P. M., Ferreira, A. A., Braga, H. A. and Barbosa, P. G. (2012). Projeto dos controladores de um conversor vsc usado para conectar um sistema de geração fotovoltaica a rede elétrica, *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*.

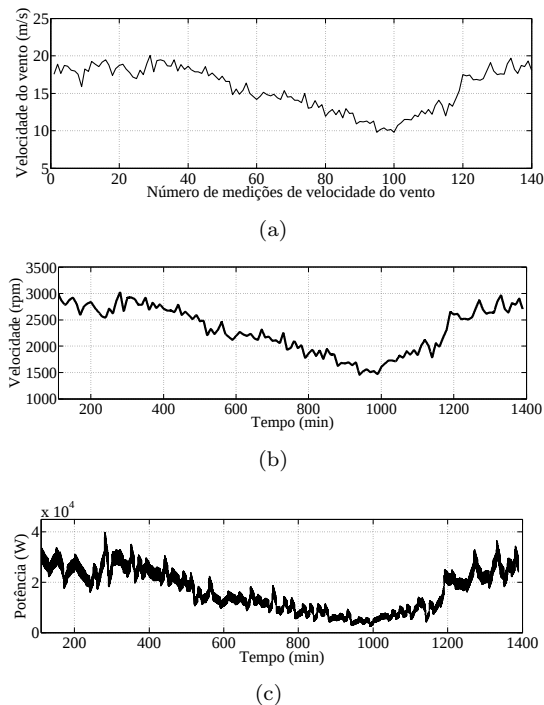


Figura 9: Resultados da simulação do PSMG com dados reais do vento: (a) velocidade do vento, (b) velocidade do gerador e (c) potência ativa gerada.

Donsión, M. (2007). Parameters influence on the control of a pmsm, *Proceedings of XIII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF 2007)*, pp. 13–15.

Huang, K., Jiang, Z., Wang, L. and Huang, S. (2014). Grid-connected control of high-speed permanent magnetic generator based on z-source inverter, *Proceedings of 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2014)*, IEEE, pp. 488–494.

Project, B. S. R. N. (2016). World radiation monitoring center, <http://bsrn.awi.de>.

Richardson, R. D. and McNerney, G. M. (1993). Wind energy systems, *Proceedings of the IEEE* **81**(3): 378–389.

Valle, R. L., Ferreira, A. A., de Oliveira, J. G., Montagner, V. F. and Barbosa, P. G. (2015). Projeto e implementação de um controlador digital preditivo para regular as correntes de um motor bldc, *Revista Eletrônica de Potência* **20**(2): 215–224.

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

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