

AValiação de desempenho de uma estrutura para emulação de parques eólicos visando estudos dos impactos sobre a rede de conexão

Leonardo B. Firmino, Alex Reis, Guilherme L. Xavier, José C. de Oliveira, Geraldo C. Guimarães
Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia – MG

Email: leo.dae@gmail.com, alexreis@doutorado.ufu.br, guilhermelealxavier@hotmail.com; jcoliveira@ufu.br; gcaixeta@ufu.br

Resumo - A crescente importância dos recursos eólicos tem motivado o desenvolvimento de abordagens computacionais e experimentais para suprir as necessidades relacionadas ao domínio do tema. Neste particular, embora o reconhecimento da realização de um grande esforço referente a modelagens computacionais, percebeu-se a importância da idealização e implementação de uma estrutura física que representa os complexos de conversão de energia eólica. À luz desses fatos e visando a implantação de uma estrutura laboratorial destinada à representação experimental em escala reduzida de unidades eólicas, este trabalho está focado em um estudo de uma estratégia para simular a fonte de energia primária através de motores de indução trifásicos. Tal estratégia se baseia na modelagem no domínio do tempo deste dispositivo, as quais permitiram a implementação de sistemas de software e hardware para controlar a máquina e, conseqüentemente, reproduzir as diferentes condições de operação impostas pelos ventos e seus correspondentes efeitos impactantes sobre a rede CA de conexão. Por fim, para destacar a potencialidade do complexo montado na representação do funcionamento de um sistema de conversão de energia eólica, um experimento foi realizado e os resultados correspondentes são apresentados e discutidos.

Palavras-Chave – Dinâmica Operacional, Emulador de Turbina Eólica, Energia Renovável, Motor de indução trifásico, Qualidade da Energia.

PERFORMANCE ANALYSIS OF A STRATEGY TO EMULATE WIND TUBINES AIMING AT POWER QUALITY STUDIES

Abstract - The growth of wind farms has motivated the development of computational and experimental approaches which supplement the needs related to the domain of the subject. Even though there have already been recognized advances made to the field of computational modeling, the development of a physical structure that represents the wind energy complexes has become relevant. In light of these facts and aiming at the implementation of a laboratory structure intended to

represent small scale wind turbines, this work focuses on a study of a strategy to emulate the wind turbine through three-phase induction motors. Such a strategy is based on time domain models, which allowed the implementation of software and hardware systems to control and drive the induction motor having in mind the final effect upon the connection grid. Lastly, experiments are realized and the results discussed for the confirmation of potentialities, along with the efficiency of the strategy used.

Keywords - Three-phase Induction Motor, Operational Dynamics, Power Quality, Renewable Energy, Wind Turbine Emulator.

I. INTRODUÇÃO

Recentes dados apontam que os atrativos e interesses manifestados pela utilização dos parques eólicos conduziram, no final de 2012, a uma capacidade instalada de 282,27 GW em todo o mundo, valor este que representa cerca de 3% de toda a demanda mundial por energia elétrica e indica um crescimento de 12% em relação ao ano de 2011 [1]. No Brasil, segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE-2021) [2], os crescentes investimentos no setor resultaram em uma capacidade instalada de 1981 MW, em dezembro de 2012. Tais projetos, estimulados principalmente pela realização de leilões de energia, recebem forte intervenção do capital privado e produzem estimativas de que, em 2015, a energia eólica ocupe cerca de 5,6% da matriz energética brasileira.

Um aspecto meritório de destaque está vinculado com os pontos de acoplamento dos parques eólicos. De fato, tais unidades de geração são conectadas em pontos das redes elétricas, que, de um modo geral, apresentam barramentos de baixo nível de curto-circuito. Diante de tal fato, estas conexões devem atender, sobremaneira, aos requisitos e procedimentos estabelecidos por documentos ou normas específicas, tais como, no cenário internacional, a IEC 61400-2 [3], ou, no âmbito brasileiro, os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da ANEEL [4] e os Procedimentos de Rede do Sistema de transmissão [5]. Dentre outros quesitos, as diretrizes apontadas por tais documentos contemplam questões atreladas com a: frequência da rede, potência ativa injetada, tensão de saída, flutuação de tensão, distorções harmônicas e suportabilidade quanto às faltas na rede [6].

Diante da realidade de que os parques eólicos se constituem, efetivamente, como uma parcela de crescimento exponencial nas matrizes energéticas, surge à necessidade de desenvolver métodos para subsidiar a análise e determinação



XI CEEL – ISSN 2178-8308
25 a 29 de novembro de 2013
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

dos impactos advindos da conexão de tais complexos às redes elétricas. Neste contexto, ressaltam-se algumas possibilidades: modelos computacionais devidamente validados; estruturas laboratoriais onde as unidades constituintes dos parques sejam representadas por equipamentos em consonância com os arranjos reais e, alternativamente, montagens experimentais em escala reduzida que permitam, respeitadas suas limitações, reproduzir alguns fenômenos relevantes e identificados com a realidade constituinte da geração sob foco.

Focando, de modo pontual, a constituição de arranjos experimentais em escala reduzida, a utilização de motores elétricos controlados em substituição aos túneis de vento se apresenta como uma alternativa bastante atrativa e de relativo baixo custo. De fato, tais recursos permitem a representação da fonte primária de energia em consonância com as características físicas produzidas pela ação dos ventos e a inserção de ações associadas aos controles utilizados em turbinas eólicas comerciais. Para tanto, duas estratégias básicas podem ser consideradas: uma baseada no emprego de motores de corrente contínua (MCC) acionados por retificadores controlados [7-11], e outra, via motores de indução trifásicos (MIT) controlados por inversores de frequência [12-14].

Inserido neste cenário, este trabalho se direciona no sentido de apresentar os resultados advindos da implementação de uma estrutura constituída por um MIT, acionado por um inversor de frequência, e destinada a emular o comportamento do conjunto vento-turbina em estudos de impactos de conexão de unidades eólicas à rede elétrica, em particular para os efeitos relacionados com as oscilações de potências, correntes e tensões e suas correspondentes interações com os indicadores de flutuação de tensão, harmônicos e variações de tensão junto ao Ponto de Acoplamento Comum. Para tanto, apresenta-se, inicialmente, a modelagem matemática para a representação do comportamento de vento-turbina, bem como os modelos para a máquina elétrica utilizada neste trabalho. Na sequência, descreve-se a arquitetura do sistema de acionamento desenvolvido para atender os objetivos aqui almejados e, por fim, através da estrutura experimental em escala reduzida obtida são apresentados os resultados experimentais da estratégia utilizada.

II. REPRESENTAÇÃO DA FONTE PRIMÁRIA ATRAVÉS DE MOTORES ELÉTRICOS

A. Modelagem Matemática do Vento

A potência do vento transmitida para uma turbina eólica é dada em (1) [15].

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A v_{vento}^3 \quad (1)$$

onde: ρ – densidade do ar; C_p é o coeficiente de potência da turbina, A – área varrida pelas pás da turbina; v_{vento} – velocidade do vento

O coeficiente C_p expressa a relação entre a potência disponível no vento e aquela extraída pela turbina eólica, sendo dependente do ângulo de passo das pás da turbina (β) e

do coeficiente adimensional λ denominado “razão da velocidade da pá”, conforme destacado na Figura 1.

Sendo a potência disponibilizada no eixo do aerogerador proporcional ao cubo da velocidade do vento, suas características são fundamentais no presente estudo. De acordo com procedimentos clássicos [16], o sinal de vento é composto pela soma de quatro componentes, a saber: a velocidade média do vento (v_{base}), rajada (v_{rajada}), rampa (v_{rampa}) e um ruído ($v_{ruído}$), como em (2).

$$v_{vento} = v_{base} + v_{rajada} + v_{rampa} + v_{ruído} \quad (2)$$

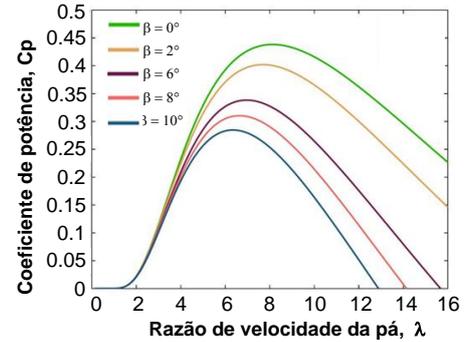


Fig. 1 – Arquitetura do sistema de acionamento e controle

A componente velocidade média do vento ou vento base é definida por um valor constante K_B , conforme apresentado em (3).

$$v_{vento} = K_B \quad (3)$$

A componente denominada por rajada do vento é calculada de acordo com (4) e (5).

$$v_{rajada} = \begin{cases} 0 & t < t_{Irajada} \\ v_{cos} & t_{Irajada} < t < t_{Irajada} + T_{rajada} \\ 0 & t > t_{Irajada} + T_{rajada} \end{cases} \quad (4)$$

$$v_{cos} = \left(\frac{R_{MAX}}{2} \right) \left\{ 1 - \cos 2\pi \left[\left(\frac{t}{T_{rajada}} \right) - \left(\frac{t_{Irajada}}{T_{rajada}} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

onde: T_{rajada} – período da rajada; $t_{Irajada}$ – tempo de início da rajada e R_{MAX} – valor máximo da rajada.

A componente da velocidade do vento denominada de rampa pode ser determinada conforme (6) e (7).

$$v_{rampa} = \begin{cases} 0 & t < t_{Irampa} \\ v_{rampa} & t_{Irampa} < t < t_{Frampa} \\ 0 & t > t_{Frampa} \end{cases} \quad (6)$$

$$v_{rampa} = RAM_{MAX} \left(1 - \frac{(t - t_{Frampa})}{t_{Irampa} - t_{Frampa}} \right) \quad (7)$$

onde: t_{Irampa} – tempo de início da rampa, t_{Frampa} – tempo final da rampa e RAM_{MAX} – valor máximo da rampa.

A componente ruído é a parte aleatória do vento, sendo caracterizada por baixas amplitudes e altas frequências quando comparada as demais componentes da fonte primárias. Esta é definida por (8), (9) e (10):

$$v_{ruído} = 2 \sum_{i=1}^N [S_V(\omega_i) \Delta\omega]^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (8)$$

$$\omega_i = \left(i - \frac{1}{2} \right) \Delta\omega \quad (9)$$

$$S_V(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 \left[1 + \left(\frac{F \omega_i}{\mu \pi} \right)^2 \right]^{\frac{4}{3}}} \quad (10)$$

onde: $\Delta\omega$ – variação da velocidade; Φ_i – variável randômica com densidade de probabilidade uniforme no intervalo de 0 a 2π ; K_N – coeficiente de arrasto da superfície; F – escala de turbulência; μ – velocidade principal do vento na altura de referência.

B. Modelagem Matemática do Motor de Indução

O modelo convencional desta máquina [17], no sistema dq0, é empregado neste trabalho. Neste contexto, as tensões do estator de eixo direto e quadratura são, respectivamente, definidas por (11) e (12), assim como as tensões de rotor de eixo direto e em quadratura são determinadas por (13) e (14). Deve-se ressaltar que as tensões do rotor são iguais a zero devido à utilização de uma máquina de indução tipo gaiola de esquilo.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L'_s \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r L'_s i_{qs} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (11)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L'_s \frac{d}{dt} i_{qs} - \omega_r \left(L'_s i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} \right) \quad (12)$$

$$0 = R_r i_{qr} + (\omega_r - \omega_m) \lambda_{dr} \quad (13)$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (14)$$

onde: v_{ds} – tensão de eixo direto do estator; i_{ds} – corrente de eixo direto do estator; i_{dr} e i_{qr} – corrente de eixo direto e quadratura do rotor, respectivamente; L'_s – parâmetro de indutância calculado por: $L'_s = L_{ls} + L_m - \frac{L_m^2}{L_{lr} + L_m}$; L_{ls} – indutância de dispersão do estator; L_{lr} – indutância de dispersão do rotor; L_m – indutância de magnetização; λ_{dr} – fluxo concatenado de eixo direto; ω_r – velocidade angular do fluxo do rotor (rad/s); ω_m – velocidade mecânica da máquina (rad/s).

Os fluxos concatenados são determinados por (15) e (16).

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (15)$$

$$\lambda_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} = 0 \quad (16)$$

Além do mais, o conjugado (T_{mec}) e a potência mecânica (P_{mec}) disponível no eixo do motor são expressos em (17) e (18), respectivamente.

$$T_{mec} = \frac{3}{2} \frac{p}{L_r} L_m i_{qs} \lambda_{dr} \quad (17)$$

$$P_{mec} = T_{mec} \omega(t) \quad (18)$$

onde p é o número de polos do motor.

Portanto, o torque mecânico do motor de indução trifásico pode ser controlado pela imposição do fluxo de eixo direto (λ_{dr}) e pela corrente de eixo em quadratura do estator (i_{qs}). Esta estratégia é amplamente explorada na literatura e é conhecida por controle por campo orientado ou controle vetorial.

III. ARQUITETURA DE HARDWARE E SOFTWARE PARA ACIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO

De acordo com os modelos anteriormente apresentados, um motor de indução trifásico será usado para representar o

conjunto vento-turbina. Neste contexto, um sistema de controle foi desenvolvido com o objetivo de simular o conjugado mecânico disponível na turbina eólica e aplicado ao gerador elétrico. A Figura 2 apresenta a arquitetura básica deste sistema.



Fig. 2 – Arquitetura do sistema de acionamento e controle

O software de controle e monitoramento foi desenvolvido na plataforma *LabVIEW*, a qual permite que o usuário interaja com o sistema de acionamento em alto nível. Este software se comunica com uma placa de aquisição de dados, a qual envia os sinais de controle aos conversores eletrônicos destinados ao acionamento dos motores. Por outro lado, para calcular o conjugado mecânico disponibilizado no eixo do gerador em função da potência extraída do vento pela turbina, a placa de aquisição de dados realiza a leitura das informações provenientes de sensores de velocidade acoplados aos eixos dos motores.

Nesse sentido, a Figura 3 apresenta o fluxograma do software de controle utilizado para o motor de indução trifásico. Neste caso, o sistema de aquisição de dados realiza a interface entre o software e um inversor de frequência, sendo que este recebe um sinal de controle proporcional ao conjugado que deve ser desenvolvido pelo motor. Nesse contexto, o inversor, por meio de seu sistema de controle interno e baseado na teoria do controle vetorial, calcula a relação tensão/frequência a ser aplicada no estator da máquina para atender às condições impostas.

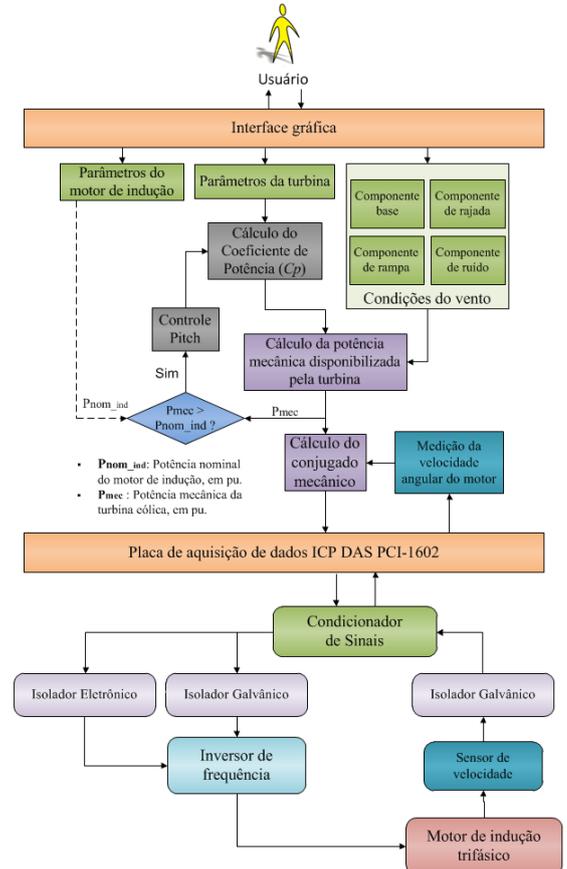


Fig. 3 – Fluxograma para controle do motor de indução trifásico

IV. ESTRUTURA FÍSICA DO LABORATÓRIO

A Figura 4 apresenta a topologia do sistema de conversão de energia eólica. Este complexo compreende a representação do conjunto vento-turbina, um gerador síncrono a imã permanente, um conversor eletrônico, um transformador e uma carga impedância constante. As condições idealizadas neste trabalho para o carregamento imposto ao gerador eólico se configuram como uma situação conhecida por carga isolada. Naturalmente, está é apenas uma hipótese que poderia ser substituída por outra condição operacional tal como conexão da geração com uma rede de distribuição local.

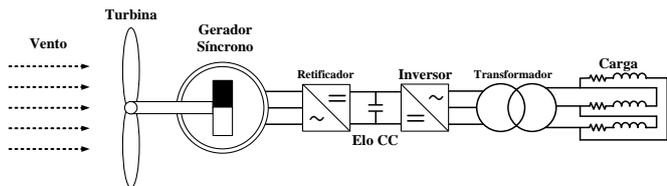


Fig. 4. Partes constituintes de um complexo eólico

Em função do arranjo previamente caracterizado, a Figura 5 mostra a estrutura laboratorial e suas principais partes, as quais estão identificadas pela numeração apresentada a seguir:

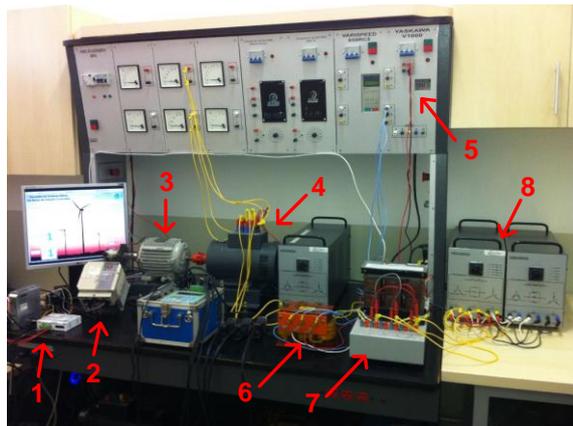


Fig. 5. Estrutura laboratorial

1. Sistema de aquisição e condicionamento de sinais;
2. Inversor de frequência para suprimento do motor de indução trifásico: 18,5 kW, alimentação 220 V/60 Hz e tensão máxima de saída de 240 V;
3. Motor de indução trifásico: 1,1 kW, 220/380 V, 1690 rpm;
4. Gerador Síncrono: 1 kVA, 1800 rpm, 4 pólos, 220/380 V;
5. Inversor de frequência para conexão do gerador síncrono à carga: 18,5 kW, alimentação 220 V/60 Hz e tensão máxima de saída de 240 V;
6. Indutor trifásico de 0,35 mH, 230 V, 60 Hz, atuando como filtro série;
7. Transformador trifásico: 1,5 kVA, 220/220 V;
8. Carga trifásica em delta: resistência de 180 Ω e uma indutância de 513 mH.

V. ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Para avaliação de desempenho da estratégia de emulação de turbinas eólicas via motores de indução trifásicos, dentre um conjunto de condições avaliadas para o vento, foi selecionado, para fins deste trabalho, a situação caracterizada na Tabela I e graficamente apresentada na Figura 6. Além do mais, a situação adotada para o estudo experimental inclui ruídos aleatórios no vento, conforme tipicamente encontrado nas instalações reais.

Tabela I – Características de veto adotadas para o estudo

Componentes do vento	Velocidade (m/s)	Instante de início (s)	Duração (s)
Base	9	1	50
Rajada	3	15	18,5
Rampa	3	30	33,5

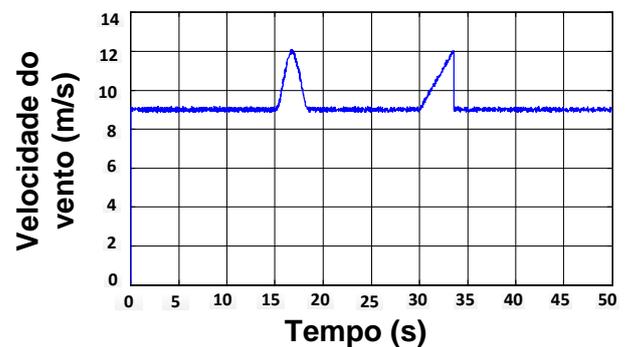


Fig. 6. Perfil do vento utilizado nos estudos

A Figura 7 apresenta a velocidade mecânica no eixo do gerador elétrico. Durante os instantes iniciais do estudo, pode-se verificar a existência um comportamento transitório desta grandeza, o qual se relaciona aos efeitos da partida do motor de indução trifásico. Todavia, após o término deste período, fica evidenciada a sensibilidade da velocidade do rotor quando da ocorrência de mudanças de comportamento do vento.

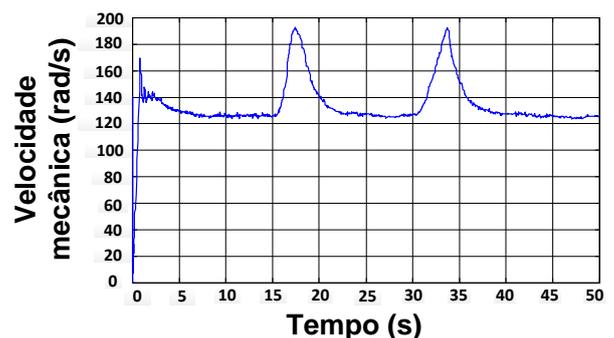


Fig. 7. Velocidade mecânica do motor elétrico ao longo do período simulado

O desempenho do coeficiente de potência (C_p), grandeza atrelada à eficiência da turbina, encontra-se indicado na Figura 8. Esta variável operacional sofre pequenas variações transitórias, em consonância com as variações do vento impostas ao complexo. Como se observa, a presença de componentes de rajada e rampa no perfil do vento ocasionam reduções no C_p visto que a razão de velocidade da pá (λ) se torna não otimizada durante estes períodos.

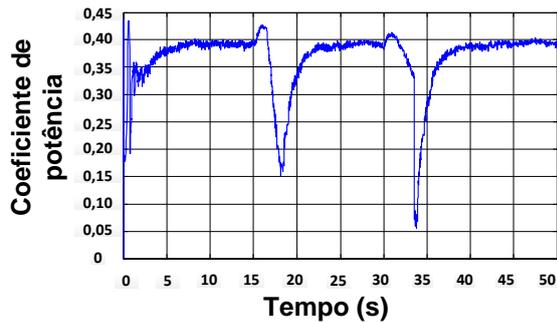


Fig. 8. Coeficiente de potência da turbina eólica

O perfil de potência apresentado na Figura 9 é utilizado como referência para o sistema de controle do motor, permitindo o cálculo do conjugado mecânico que devem ser aplicado ao gerador síncrono para a emulação do comportamento da turbina. Observando-se tal figura fica evidenciada a sensibilidade da potência às condições impostas de vento. Por outro lado, muito embora o sistema de acionamento inclua um mecanismo para representar a variação do ângulo das pás da turbina, o qual é conhecido como controle *Pitch*, pode-se verificar que sob a ação das condições operacionais adotadas para o presente estudo, não houve em nenhum instante, limitações na transferência de energia para o gerador síncrono, fato este ilustrado pela Figura 10, a qual representa a variação do ângulo de passo das pás da turbina durante o período de estudo.

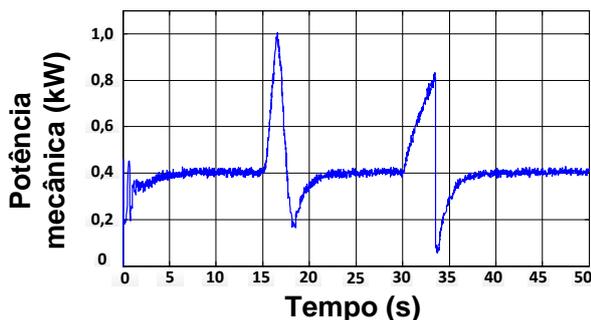


Fig. 9. Potência mecânica a ser disponibilizada pelo motor

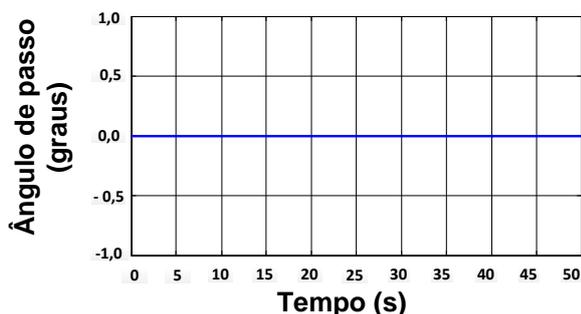


Fig. 10. Comportamento do ângulo de passo da turbina

Por fim, a Figura 11 ilustra o conjugado mecânico aplicado no eixo do gerador elétrico para a estratégia aqui avaliada. Esta variável é calculada a partir da relação entre o perfil de potência usado como referência para o sistema de controle e a velocidade mecânica medida. O resultado mostra que, como uma consequência direta do comportamento do vento, há um correspondente aumento no conjugado durante a rajada e a rampa. Todavia, após a ocorrência das variações

do vento, fica evidente a redução nos valores do conjugado, fato este relacionado ao funcionamento do inversor utilizado para conectar o gerador síncrono à carga. Dessa maneira, considerando que uma condição de operação em carga isolada foi escolhida para o estudo, o inversor manteve constante a tensão e frequência de saída, implicando que a carga se comporta como uma potência constante. Portanto, durante aumentos na velocidade do vento, o inversor não transfere toda a potência disponível para a carga, resultando em um incremento na velocidade mecânica e uma redução do conjugado. Também, as oscilações visivelmente presentes se apresentam como fenômenos capazes de produzir fortes impactos sobre os indicadores de qualidade, tema este que se apresenta como o grande objetivo desta pesquisa.

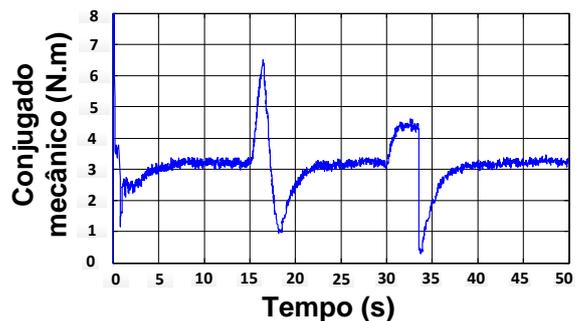


Fig. 11. Conjugado mecânico fornecido ao eixo do gerador elétrico

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a implementação de uma estratégia para a representação do comportamento do conjunto vento-turbina via motores elétricos, os quais se constituem como alternativas atrativas quando comparados à construção de túneis de ventos. Tal estratégia compõe um ambiente laboratorial, em escala reduzida, representativo de sistemas comerciais de conversão de energia eólica e, dentro das condições postas, se apresentam como recursos importantes para as atividades de pesquisa sobre os impactos nos indicadores de qualidade da energia advindos da conexão de sistemas de conversão de energia eólica às redes elétricas. Destes, de uma forma mais diretamente afeita às questões da qualidade da energia, ressaltam-se as flutuações de tensão, distorções harmônicas, dinâmica operacional, etc., os quais se apresentam diretamente correlacionados com as potências disponibilizadas para o complexo de geração em pauta.

No que tange aos resultados obtidos, estes se apresentaram, sob o ponto de vista qualitativo, com boa aderência ao desempenho físico esperado. No entanto, deve-se ressaltar que, muito embora o MIT possua conhecidas vantagens associadas com menores custos, elevada robustez e maior simplicidade, o emprego de outros tipos de máquinas, a exemplo de um motor de corrente contínua, também pode se tornar uma opção atraente.

Por fim, a estratégia discutida se apresenta como uma alternativa encorajadora para a simulação laboratorial de turbinas eólicas e o consequente estudo dos impactos da conexão de unidades de geração eólica, sob o ponto de vista da dinâmica do sistema elétrico e da qualidade da energia.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPEMIG e CAPES para concessão de bolsas de pós-graduação para apoio ao presente projeto de pesquisa. Além disso, eles são gratos a Furnas/Eletrabras pelo suporte financeiro através de seu programa de Pesquisa e Desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- [1] World Wind Energy Association (WWEA), “WWEA Annual Report 2012”. Acessado em 21 de maio de 2013, em: <http://wwindea.org/home/index.php>.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), “Plano Decenal de Expansão de Energia 2021”, Brasília, Jan. 2013. Acessado em 21 de maio de 2013, em: http://www.epe.gov.br/PDEE/20130326_1.pdf
- [3] *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Jan. 2010.
- [4] *Procedimentos de Rede - Submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão*, Operador Nacional do Sistema (ONS), Set. 2010.
- [5] *Wind turbines – Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines*, International standard IEC 61400-21, Aug. 2008.
- [6] M. Mohseni, S. M. Islam, “Review of international grid codes for wind integration: diversity, technology and a case for global standard”, *Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 3876-3890, April 2012.
- [7] R. I. Ovando, J. Aguayo, M. Cotorogea, ‘Emulation of a Low Power Wind Turbine with a DC motor in Matlab/Simulink’, in Proc. 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference – PESC 2007, pp. 859 – 864, June 2007.
- [8] A. Mahdy, S. M. El-Hakim, H. H. Hanafy, ‘Small Wind Turbine Emulator with separately excited DC Motor using Analog Electronic Circuit’, in Proc. IET Conference on Renewable Power Generation, September 2011.
- [9] M. Monfared, H. M. Kojabadi, H. Rastegar, ‘Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled DC motor’, *Elsevier: Renewable Energy*, vol. 33, no. 8, pp. 906-913, May 2008.
- [10] F. H. Costa, A. Reis, G. L. Xavier, E. B. Alvarenga, J. C. Oliveira, G. C. Guimarães, A. F. Bonelli, Z. S. Vitorio, ‘A Laboratory Structure for Dynamic and Power Quality Studies of Wind Farms’, presented at 2011 IEEE Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Natal, Brazil, September, 2011.
- [11] B. Gong, D. Xu, ‘Real Time Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion System’, in Proc. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference – PESC 2008, pp. 1110 – 1114, June 2008.
- [12] S. W. Mohod, M. V. AWARE, ‘Wind Energy Conversion System Simulator using Variable Speed Induction Motor’, presented at 2010 Power Electronics, Drives and Energy (PEDES), Aurangabad, India, December, 2010.
- [13] H. M. Kojabadi, L. Chang, T. Boutot, ‘Development of a Novel Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems Using an Inverter-Controlled Induction Motor’, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 3, pp. 547-552, September 2004.
- [14] R. G. Oliveira, G.G. Parma, S. R. Silva, ‘Development of a Wind turbine Simulator for Wind energy conversion systems – Experimental Results’, presented at 2007 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Blumenau, Brazil, October 2007.
- [15] Z. Chen, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, ‘A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines’, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 1859-1875, August 2009.
- [16] P. M. Anderson, A. Bose, ‘Stability Simulation of Wind Turbine Systems’, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS 102, N° 12, pp. 3791 – 3795, December, 1983.
- [17] P. C. Krause, C. H. Thomas, “Analysis of Electric Machinery” McGraw Hill Book Company, 1986.