

Avaliação Computacional de Estratégia para Regulação de Tensão no Ponto de Conexão de Unidades Eólicas

Alex Reis¹, Leandro Pains Moura², José Carlos Oliveira²

¹Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Brasília – DF

²Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG

Resumo – A crescente demanda por fontes de energia de baixo impacto ambiental tem intensificado a importância dos parques eólicos em muitos países. No entanto, em virtude das características operacionais destes complexos, as quais se traduzem em uma variabilidade da energia produzida e no emprego de conversores eletrônicos, a interação entre centrais eólicas e redes de conexão se mostra como uma área de fortes interesses investigativos. De fato, dentre os diversos fenômenos existentes, as variações de tensão em regime permanente se constituem em um tema sob constante atenção de órgãos responsáveis pela operação de sistema de elétricos. Nesse contexto, o presente artigo se encontra direcionado para a análise de uma filosofia operativa direcionada para sistemas de geração eólica à máquina síncrona e conversores plenos, visando que tais complexos participem do processo de regulação de tensão em seu ponto de conexão. Por meio de simulações computacionais na plataforma ATP/EMTP, são apresentados resultados que atestam a eficácia da estratégia sob avaliação.

Palavras-chave – Compensação Reativa, Energia Eólica, Regulação de Tensão, Qualidade da Energia.

I. INTRODUÇÃO

Recentes dados apontam que tais interesses conduziram, até junho de 2014, a uma capacidade de geração instalada em todo mundo de cerca de 360 GW, número este que reflete um aumento de cerca de 16% em relação ao mesmo período de 2013 [1]. Alguns países, a exemplo de Dinamarca, possuem parques eólicos responsáveis por produzir cerca de 42% de toda a energia elétrica consumida. No Brasil, muito embora o panorama atual apresente números inferiores aos apresentados, há de se reconhecer que os horizontes futuros apontam para um crescimento exponencial desta fonte [2]. Neste particular, é esperado que, para o ano de 2020, a produção de energia eólica atinja cerca de 9% de toda geração elétrica produzida no país.

Todavia, em virtude das características operacionais destes complexos, a interação entre os parques eólicos e redes elétricas se mostra como uma área de fortes interesses investigativos. De fato, a conexão destas fontes de energia aos sistemas de transmissão ou distribuição pressupõe o atendimento a diversos requisitos e procedimentos, os quais se encontram estabelecidos em documentos ou normas específicas, tais como a IEC 61400-21 [3], ou a IEEE 1457 [4], ou ainda códigos de rede de específicos de cada país [5].

Nesse contexto, surge a temática relacionada com os impactos que estas fontes de energia provocam e, ao mesmo tempo, estão sujeitas quando em operação interligada ao sistema elétrico. Há de se reconhecer que os operadores de sistemas de transmissão de diversos países têm desenvolvido critérios específicos associados à compensação de potência reativa e regulação de tensão no ponto de conexão de unidades eólicas. O estabelecimento de tais condições tem por objetivo determinar que um parque eólico, sob diferentes condições de funcionamento, participe efetivamente do controle e estabilização de tensão e frequência, fornecendo serviços ancilares para as redes elétricas.

Nesse contexto, diversas pesquisas e publicações têm sido realizadas com vistas à caracterização dos efeitos mencionados anteriormente, bem como para o desenvolvimento de medidas mitigadoras. No que tange os aerogeradores constituídos por “conversores plenos” [6], a utilização das unidades inversoras para a compensação de potência reativa é abordado em [7] e [8]. Estas apresentam resultados qualitativos associados à adição desta funcionalidade, sem, todavia, apresentar pormenores da estratégia de controle empregada. Em [9], estabelece-se uma filosofia de controle para um conversor do tipo *back to back*, a qual viabiliza a injeção de toda a energia proveniente do vento na rede elétrica, e ainda, permite o fornecimento fixo de potência reativa. Tal trabalho considera os limites operacionais para um inversor, no que tange a relação entre fornecimento de potência e qualidade da energia, conforme apresentado em [10]. Em [11] é descrito o uso de controladores adaptativos para o conversor *back to back* e descreve outra metodologia com vistas a evitar que a unidade inversora opere em sobrecarga e de forma não linear. Os resultados apresentados em [12] demonstram uma análise computacional de uma metodologia para regular a tensão no ponto de acoplamento via um despacho otimizado de potência reativa para um parque eólico. Outros desenvolvimentos relacionados a esta temática são apresentados em [13-17].

Diante dos fatos anteriormente apresentados, este trabalho tem por objetivo apresentar uma estratégia operacional para o ajuste do intercâmbio de potência reativa, tendo em vista o suporte ao processo de regulação da tensão nos pontos de acoplamento de parques eólicos. O procedimento apresentado estabelece um mecanismo para a definição dinâmica do despacho de potência reativa, de forma que cada aerogerador possa

Os autores agradecem a CAPES pelo suporte financeiro para realização desta pesquisa, através de seu programa de bolsas de pós-graduação. Agradecimentos também são direcionados à FAPEMIG, pelo financiamento da pesquisa através do Projeto TEC APQ 2381-13.

contribuir, dentro de suas características nominais, para o ajuste da tensão e integre funcionalidades semelhantes àquelas encontradas comercialmente nos dispositivos STATCOM. À luz das premissas postas, os seguintes pontos focais são abordados:

- Apresentação dos fundamentos matemáticos relativos às variações de tensão em regime permanente em redes elétricas, tendo em vista a definição das variáveis de controle para mitigação destes fenômenos;
- Definição de estratégia de controle destinada à regulação de tensão via ajuste do fluxo de potência reativa;
- Realização e discussão de estudos computacionais para a avaliação de desempenho da metodologia. Para tanto, serão consideradas unidades eólicas constituídas por conversores plenos e máquinas síncronas, quando submetidas a oscilações da fonte primária de energia.

II. VARIAÇÕES DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Um dos impactos associados a integração de parques eólicos às redes elétricas se caracteriza pela alteração do perfil de tensão em regime permanente. De fato, a correlação entre o fluxo de potência ativa, reativa e a relação entre resistência e reatância vista do ponto de acoplamento são variáveis diretamente relacionadas ao comportamento da tensão em uma rede elétrica.

De forma a ilustrar a problemática, a Fig. 1 apresenta um diagrama unifilar simplificado, o qual representa o acesso de uma central geradora. Baseado nos mecanismos de controle das unidades inversoras existentes em tais sistemas, o parque eólico é representado por uma fonte de corrente equivalente, a qual está associada às impedâncias $\hat{Z}_I$, $\hat{Z}_T$ e $\hat{Z}_R$, referentes, respectivamente, à rede interna do parque eólico, ao transformador da subestação coletora e ao equivalente da rede elétrica.

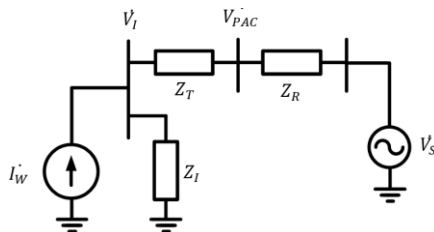


Figura 1. Diagrama unifilar simplificado, em frequência fundamental, referente ao acesso de um parque eólico.

Nestas condições, a tensão no ponto de acoplamento do parque eólico é calculada por (1), a qual relaciona as grandezas supracitadas.

$$\dot{V}_{PAC} = \frac{\hat{Z}_T + \hat{Z}_I}{\hat{Z}_R + \hat{Z}_T + \hat{Z}_I} \dot{V}_S + \frac{\hat{Z}_R \hat{Z}_I}{\hat{Z}_R + \hat{Z}_T + \hat{Z}_I} \dot{I}_W \quad (1)$$

onde: $\dot{V}_{PAC}$ é a tensão no ponto de acoplamento; $\dot{I}_W$ é a corrente produzida pelo parque eólico; $\dot{V}_S$ é a tensão do equivalente da rede elétrica.

A Fig. 2 ilustra a correspondência entre as variações de tensão em regime permanente e os diferentes carregamentos impostos pelo parque eólico, tendo em vista diferentes cenários para a

tensão $\dot{V}_S$. Dessa maneira, caso a compensação de potência reativa pelo complexo de geração não seja realizada, violações dos limites adequados de tensão poderão ocorrer em diferentes situações. Tal avaliação está associada a um sistema com as seguintes características:

- PAC: nível de curto-circuito de 200 MVA, 80° , 138 kV;
- Transformador coletor: 34,5 kV/138 kV, 70 MVA, $Z(\%) = 10 \%$;
- Rede interna: $\hat{Z}_I = 736,1 \angle -89^\circ \Omega$, 34,5 kV.

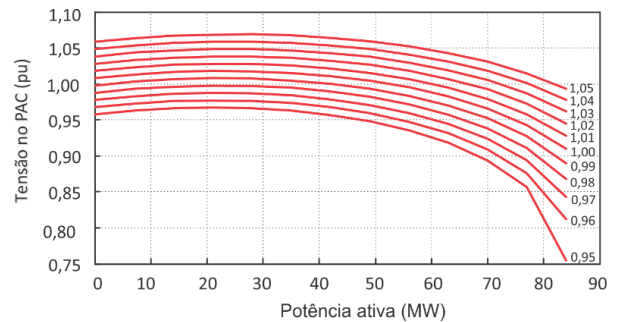


Figura 2. Tensão no PAC em função da potência produzida pelo parque eólico.

III. ESTRATÉGIA PARA A COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA

A definição dos valores de referência para a malha de ajuste do fluxo de potência reativa proposta neste trabalho se baseia no tradicional controle *droop* relatado em [14]. A utilização desta metodologia para o controle de inversores tem sua origem na aplicação destes equipamentos como mecanismos de suprimento de energia em sistemas isolados da rede elétrica ou em micro redes, possibilitando, desta forma, que estes dispositivos reproduzam um comportamento dinâmico semelhante às tradicionais gerações síncronas e seus reguladores [18]. Nesse sentido, as relações de potência ativa e reativa com frequência e tensão, respectivamente, podem ser emuladas pelo sistema de controle do conversor.

A implementação do controle em *droop* pode ser realizada por uma das estratégias abaixo descritas:

- *droop* direto: neste caso, o sistema de controle deve realizar a medição de variações de potência ativa e reativa existente no sistema e, por conseguinte, determinar a frequência e tensão de referência a ser sintetizada nos terminais de saída do inversor;
- *droop* indireto: nesta situação, os controladores operam de forma inversa, e a filosofia seguida se baseia na medição das variações de frequência e tensão no ponto de interesse e o consequente despacho de potência ativa e reativa.

Tendo em vista que o presente trabalho tem por objetivo a estruturação de um mecanismo que viabilize a operação de uma unidade eólica, em termos de fornecimento de potência reativa, de forma semelhante aos dispositivos STATCOM [19], o sistema de compensação indireta será utilizado para definir as referências para a malha de controle do fluxo de potência reativa. Assim, uma

Este diagrama ilustra o comportamento de uma linha de transmissão com tensão constante. O eixo vertical representa a Tensão (pu) e o eixo horizontal representa a Potência reativa (pu). A curva de operação é uma linha vermelha que permanece constante no nível de tensão e se estende horizontalmente através da região indutiva (à direita do eixo) até a potência reativa máxima suportada, onde se torna vertical. Um ponto específico na curva é rotulado como "Ponto de operação".

Genericamente, a equação (2) define o comportamento de um sistema controlador do tipo *droop*.

onde: Q_{ref} é a potência reativa usada como referência pela malha de controle; V_n é a tensão nominal no ponto de acoplamento; Q_n é a potência reativa a ser produzida para a tensão nominal; K_v é o ganho da curva *droop*.

$$Q_{ref} = \frac{V_{PAC} - V_n}{K_n} \quad (3)$$

onde: V_{max} é a máxima tensão no ponto de acoplamento; V_{min} é a mínima tensão no ponto de acoplamento; $Q_{max, cap}$ limite para a potência reativa capacitiva do conversor; $Q_{max, ind}$ limite para a potência reativa indutiva do conversor.

situações operacionais em que os níveis de tensão no ponto de acoplamento do aerogerador são inferiores à V_{min} . Sob tais condições, verifica-se que toda a capacidade do conversor do lado da rede é empregada para o fornecimento de potência reativa, tendo em vista o suporte de tensão do sistema. Para níveis de tensão inferiores à $V_{min,op}$, a estratégia de controle interrompe o fornecimento de potência reativa, de forma a não contribuir para correntes de curto-circuito. Quando isto ocorre, deve-se ressaltar que as unidades eólicas permanecem conectadas ao sistema elétrico, sem suprir, todavia, potência reativa.

Para demonstrar a eficácia da metodologia destinada à compensação de potência reativa, um estudo de caso contemplando uma rede de distribuição real foi selecionada para análise. A plataforma ATP/EMTP [20] foi escolhida para a simulação, sendo que as principais características referentes aos modelos da rede e aerogerador são apresentadas na sequência.

A Fig. 4 apresenta o diagrama unifilar da rede elétrica e as Tabelas I a V mostram os respectivos parâmetros elétricos. Deve-se destacar que o parque eólico em pauta se encontra conectado ao barramento 3, o qual possui um nível de tensão de 138 kV.

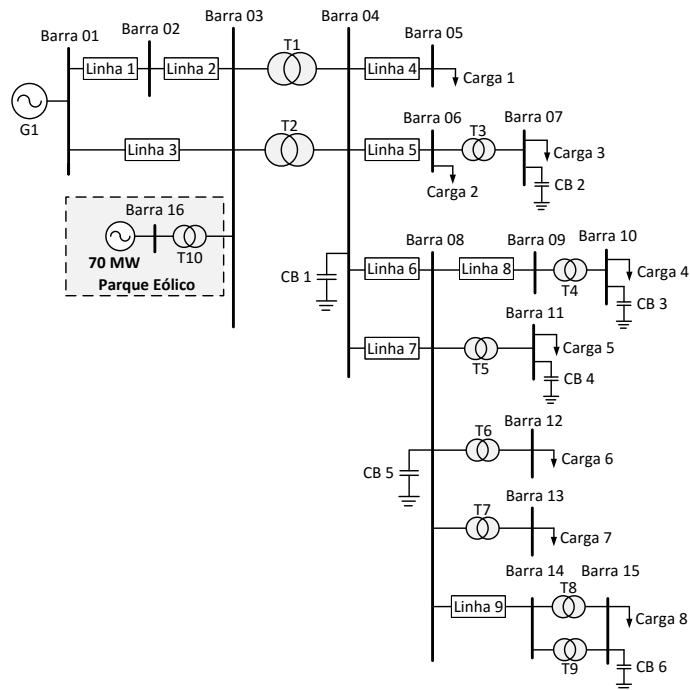


TABELA I. GERADOR EQUIVALENTE (BARRA 01)

Gerador	Tensão Nominal (kV)	Nível Curto-circuito (MVA)
G1	138	680

TABELA II. PARÂMETROS DAS LINHAS

Linha	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Capacitância (μ F)
1	17,05	152,55	1,14
2	2,51	22,43	0,167
3	16,72	172,51	1,33
4	9,88	60,34	0,48
5	0,06	0,36	0,003
6	2,37	14,48	0,11
7	2,09	18,19	0,14
8	13,05	54,52	0,37
9	0,7	6,06	0,05

TABELA III. PARÂMETROS DOS TRANSFORMADORES

Transformador	Potência Nominal (MVA)	Tensões Nominais (kV)	Impedância (%)
1	60	138/69	15,60
2	60	138/69	15,60
3	12	69/13,8	4,64
4	5	69/13,8	6,01
5	12	69/13,8	8,35
6	12	69/13,8	8,35
7	12	69/13,8	8,35
8	12	69/13,8	6,15
9	12	69/13,8	6,15
10	70	34,5/138	12,0

TABELA IV. PARÂMETROS DAS CARGAS

Carga	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
1	20,80	8,90
2	1,80	0,80
3	5,40	2,30
4	2,10	0,90
5	7,10	3,00
6	0,90	0,40
7	3,00	1,30
8	18,90	8,10

TABELA V. PARÂMETROS DOS BANCOS DE CAPACITORES

Barra	Potência Nominal (MVar)
4	13,8
7	1,02
10	1,02
11	4,00
8	5,08
15	5,05

B. Modelagem do parque eólico

A Fig. 5 apresenta o diagrama unifilar do parque eólico, o qual contém 35 unidades aerogeradoras. Considerando que o interesse do trabalho consiste na avaliação da estratégia de compensação de potência reativa diante de variações do fornecimento de potência ativa pelo parque eólico, a qual está associada às intermitências do vento, as unidades eólicas foram modeladas individualmente, considerando a metodologia descrita em [21]. Este último trabalho considera um modelo detalhado para representar o comportamento da topologia apresentada na Fig. 6. na plataforma ATP/EMTP. A Tabela VI apresenta as principais características do aerogerador simulado.

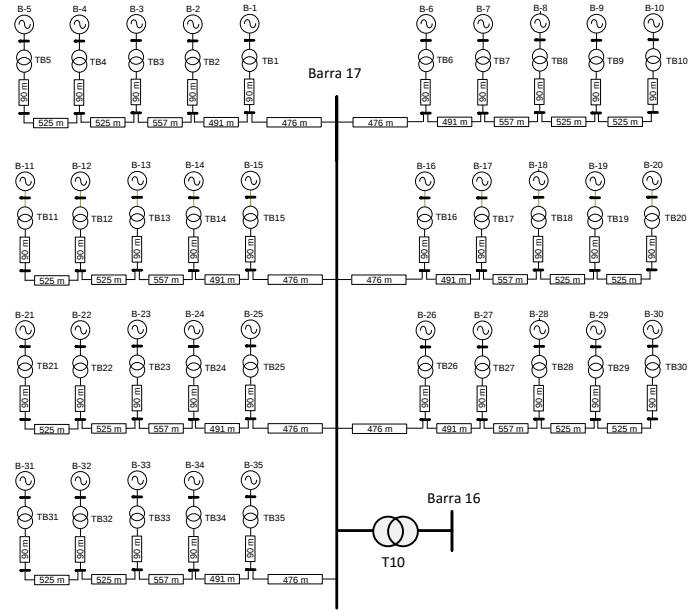


Figura 5. Diagrama unifilar do parque eólico empregado para os estudos.

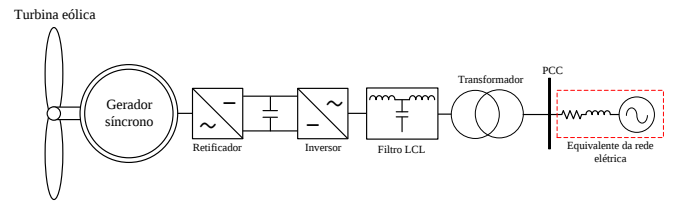


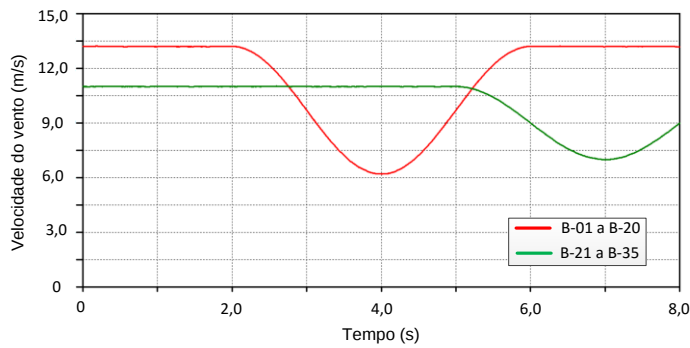
Figura 6. Topologia de um dos aerogeradores simulados.

TABELA VI. CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE INVERSORA

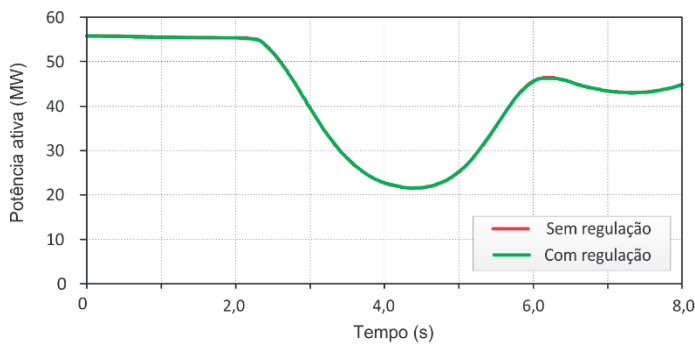
Característica operacional	Valor
Potência nominal	2,00 MVA
Tensão no barramento CC do inversor	1200,00 V
Frequência de chaveamento	2500,00 Hz
Filtro LCL – Indutância do lado do conversor	0,14 mH
Filtro LCL – Capacitância	780,00 μ F
Filtro LCL – Resistência de amortecimento	0,10 Ω
Filtro LCL – Indutância do lado da rede	0,14 mH

V. AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL

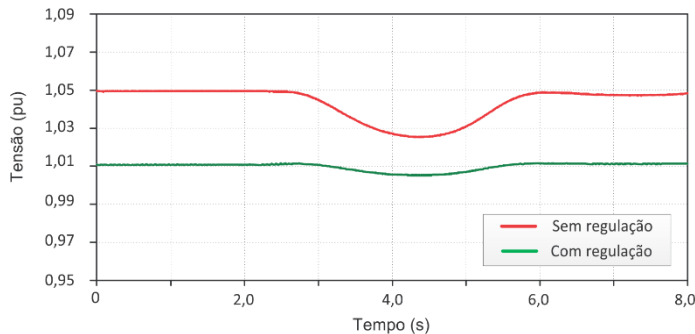
Esta seção apresenta resultados de estudos computacionais com vistas a ratificar o comportamento da estratégia de compensação de potência reativa apresentada anteriormente, quando de variações da fonte primária. Tendo em vista que o parque eólico é constituído por 35 unidades aerogeradoras, a escolha dos ventos incidentes sobre cada grupo de turbinas culminou nas informações apresentadas na Fig. 7, sendo que cada grupo possui seu perfil de vento com características distintas.



Como consequência direta desta condição operativa, a Fig. 8 apresenta as potências ativas injetadas pelo parque eólico na rede elétrica para duas situações: uma primeira em que a estratégia para regulação de tensão está ativada, e uma outra, para a qual o parque eólico opera com fator de potência unitário. Para as duas situações, antes da imposição da rajada, o parque eólico fornece à rede elétrica cerca 55 MW, e, em consonância com as alterações adotadas para a fonte primária, esta variável atinge níveis da ordem de 22 MW.



Tendo em vista as flutuações dos fluxos das potências ativas caracterizadas anteriormente, a Fig. 9 apresenta o perfil da tensão no ponto de acoplamento do parque eólico. Este, em consonância com informações constantes no respectivo diagrama unifilar, corresponde ao barramento 03 da rede elétrica em estudo.

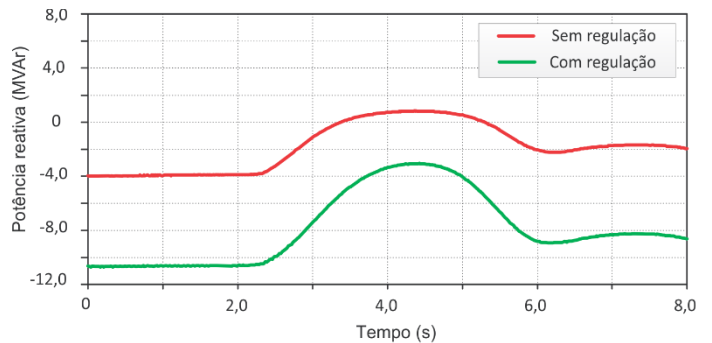


Os resultados anteriormente mostrados evidenciam que o perfil das tensões do mencionado barramento sofre alterações em sua magnitude devido, principalmente, as alterações nos

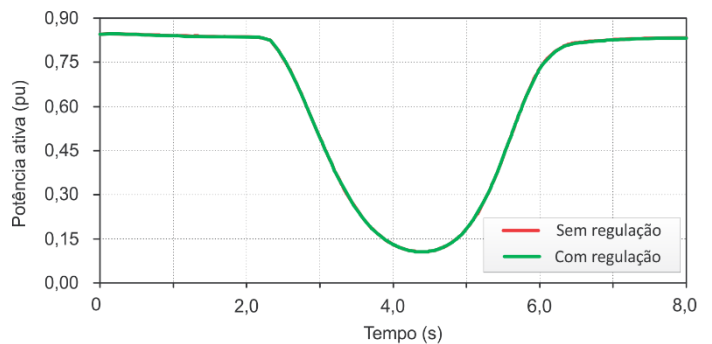
carregamentos dos alimentadores do sistema de distribuição em função das condições de geração do complexo. De forma pontual, a comparação da tensão eficaz no ponto de conexão, quando as unidades aerogeradoras operam com controle de tensão e com fator de potência unitário, mostra que:

- Antes da ocorrência das alterações do vento, o mecanismo de regulação de tensão proporciona patamares mais próximos aos valores nominais, os quais foram considerados como sendo 1 pu para este estudo;
- Durante o período de mudanças no estado da fonte primária, o perfil da tensão para o caso sem regulação indica variações de até 3%, fato este não verificado quando da compensação de potência reativa.

De forma complementar, a Fig. 10 mostra o fluxo de potência reativa no ponto de conexão para as duas situações consideradas. Tal grandeza possui variações dentro da faixa de fator de potência definida pela legislação.



Analisando, especificamente, o comportamento de uma das unidades de geração eólica que perfazem o complexo, as Figuras 11(a) e 11(b) mostram, respectivamente, as potências ativa e reativa fornecidas à rede elétrica, mostrando que a metodologia proposta proporciona meios para a regulação de tensão de forma descentralizada. Assim, reconhecido que, muitas vezes, um parque eólico ocupa grandes áreas territoriais, fato este determinante para a imposição de distintas condições de geração de energia ativa, fica evidenciado que cada aerogerador contribui com parcelas de potência reativa diferentes, em consonância com suas características operacionais particulares.



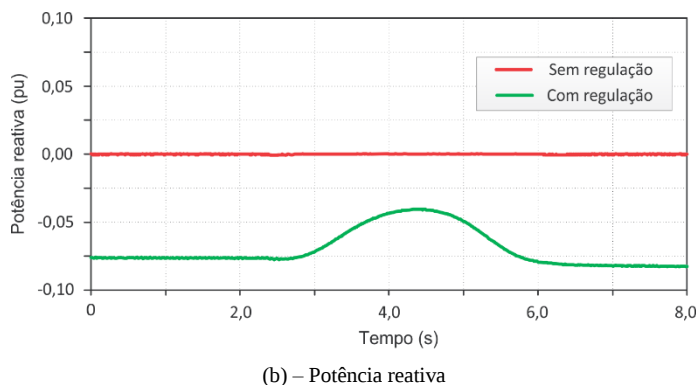


Figura 11. Potência produzida por um aerogerador (Base: 2,35 MVA).

VI. CONCLUSÕES

O presente artigo foi focado na avaliação de uma estratégia de controle direcionada a unidades eólicas a conversores plenos, com vistas ao ajuste do fluxo de potência reativa e consequente participação no processo de regulação da tensão do ponto de conexão. A metodologia apresentada se apoia, fundamentalmente, na utilização das unidades inversoras existentes nestes complexos como mecanismo de compensação, eliminando, pois, a instalação de equipamentos externos, tais como bancos de capacitores ou reguladores eletrônicos.

Dentro dos princípios postos, as necessidades de potência reativa do sistema são definidas a partir das tensões no ponto de acoplamento e de uma curva em *droop* predefinida. Esta última permite um processo de compensação descentralizado, uma vez que cada aerogerador contribui dentro de seu estado momentâneo de funcionamento. Em vista os resultados obtidos, as seguintes considerações pontuais se apresentam relevantes para a análise da eficácia do processo, da modelagem e dos desempenhos obtidos:

- A utilização das unidades aerogeradoras para o processo de compensação dinâmica de potência reativa e participação no controle de tensão do ponto de acoplamento se mostra promissor, uma vez que distúrbios na qualidade da tensão podem ser mitigados a partir da utilização dos conversores existentes nestas gerações;
- A metodologia apresentada permite que as unidades aerogeradoras operem, no que tange ao fluxo de potência reativa, de forma semelhantes a dispositivos STATCOM. Assim, os valores de referências para esta grandeza dependem da tensão no ponto de conexão e são determinadas a partir de uma curva em *droop*;
- Além do mais, a partir da referida curva, cada aerogerador contribui, dentro de seus limites operacionais, para a regulação de tensão, proporcionando, assim, um mecanismo descentralizado de compensação;
- No que tange aos resultados computacionais, estes se apresentam, sob o ponto de vista qualitativo, com boa aderência ao desempenho físico esperado.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] WWEA, "WWEA publishes Half-year Report 2013," Bonn, Alemanha2013.
- [2] EPE, "Plano Decenal de Expansão de Energia 2022," Brasília2013.
- [3] IEC, "Wind turbines – Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines," 2008.
- [4] IEEE, "IEEE Application Guide for IEEE Std 1547(TM), IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," 2009.
- [5] ONS, "Procedimentos de Rede ", Brasilia2010.
- [6] F. Blaabjerg, M. Liserre, and M. Ke, "Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 708-719, 2012.
- [7] A. Beekmann, J. Marques, E. Quitmann, and S. Wachtel, "Wind energy converters with FACTS Capabilities for optimized integration of wind power into transmission and distribution systems," in *Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium*, 2009, pp. 1-1.
- [8] S. Wachtel, S. Adloff, J. Marques, and M. Schellschmidt, "Certification of Wind Energy Converters with FACTS Capabilities," in *European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEC 2008)*, Brussels, 2008, pp. 1-7.
- [9] M. Chinchilla, S. Arnaltes, and J. C. Burgos, "Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 130-135, 2006.
- [10] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. C. Burgos, and J. L. Rodríguez, "Power limits of grid-connected modern wind energy systems," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 1455-1470, 7// 2006.
- [11] S. Li, T. A. Haskew, Y.-K. Hong, and L. Xu, "Direct-current vector control of three-phase grid-connected rectifier–inverter," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 357-366, 2// 2011.
- [12] H.-W. Kim, S.-S. Kim, and H.-S. Ko, "Modeling and control of PMSG-based variable-speed wind turbine," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 46-52, 1// 2010.
- [13] S. M. Mueen, R. Takahashi, T. Murata, and J. Tamura, "A Variable Speed Wind Turbine Control Strategy to Meet Wind Farm Grid Code Requirements," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 331-340, 2010.
- [14] F. Katiraei and M. R. Iravani, "Power Management Strategies for a Microgrid With Multiple Distributed Generation Units," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 1821-1831, 2006.
- [15] Slootweg, J. G. Slootweg, H. de, S. W. H. d. Haan, Polinder, H. Polinder, et al., "Voltage Control Methods with Grid Connected WindTurbines: a tutorial review," *Wind Engineering*, vol. 25, pp. 353-365, 11/01/ 2001.
- [16] N. R. Ullah, K. Bhattacharya, and T. Thiringer, "Wind Farms as Reactive Power Ancillary Service Providers - Technical and Economic Issues," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 661-672, 2009.
- [17] H. Amaris and M. Alonso, "Coordinated reactive power management in power networks with wind turbines and FACTS devices," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 2575-2586, 2011.
- [18] E. A. Coelho, P. C. Cortizo, and P. F. D. Garcia, "Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 533-542, 2002.
- [19] B. Singh, R. Saha, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "Static synchronous compensators (STATCOM): a review," *Power Electronics, IET*, vol. 2, pp. 297-324, 2009.
- [20] EEUG, *ATP – Alternative Transient Program - Rule Book*. Bruxelles, Belgica: Leuven EMTP Center, 1987.
- [21] A. Reis, "Uma Contribuição para o Controle Operativo de Unidades Eólicas: Modelagem, Regulação de Tensão e Minimização das Distorções Harmônicas," Doutorado Tese, Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, 2015.