



Melhoria na Qualidade da Energia Produzida por Sistemas Eólicos com Armazenamento de Energia: Portfólio de Alternativas

Antonio Carlos de Barros Neiva¹ e Igor Jasmim¹

1 DTE / CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica / Eletrobras
Av. Horário Macedo 354, 21941-911, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
neiva@cepel.br ; igorjasmim@gmail.com

RESUMO

Evitar barreiras para o crescimento da geração das energias renováveis é importante para o desenvolvimento sustentável da sociedade. No caso da Energia Eólica, a estabilidade das redes de transmissão é afetada quando há um número considerável de usinas está gerando em uma região onde a rede é considerada fraca, em termos do sistema de transmissão. Este aspecto restringe a produção e até impede instalação de novos empreendimentos eólicos, como ocorre em algumas regiões do Brasil. A solução para esta limitação, principalmente em regiões onde existe grande disponibilidade do recurso eólico, configura um desafio tecnológico relevante.

O presente trabalho coloca o problema em aspectos relativos a qualidade da energia produzida e avalia as opções mais frequentes na literatura, e apresenta, de forma resumida, diversas alternativas de configurações apresentadas para solucionar o problema.

Desta forma esta revisão de literatura técnica apresenta o problema de forma adequada, indica soluções mais prováveis e serve como introdução preliminar e referência básica para um estudo mais aprofundado do tema, levando em conta as considerações apresentadas ao final do trabalho.

Keywords: *Estabilidade de rede, armazenamento de energia, eólica.*



INTRODUÇÃO

A necessidade de incentivar e fortalecer a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis já é um consenso na sociedade e na comunidade científica. A participação da energia eólica na matriz energética tem aumentado no Brasil e no mundo, e esta tendência deve prevalecer nas próximas décadas. A previsão de que as instalações eólicas no Brasil representarão 47 GW em 2040 [1] justifica empenho em atacar possíveis problemas que obstruam estes planos. A energia produzida nos parques eólicos apresenta uma característica indesejável para a estabilidade da rede de transmissão, que dependendo das características da rede, pode impedir a instalação de novos parques eólicos em determinadas regiões. Alguns autores colocam distintos limites para a penetração máxima de geração eólica em um sistema, com as tecnologias atualmente aplicadas, entre 15% [2] e 30% [3]. De fato ocorrem restrições na geração eólica em função de problemas de estabilidade, conforme relatado em boletim do ONS [4], relativo a um compensador estático do sistema operando no limite.

Devido a natureza variável e estocástica das energias renováveis solar e eólica, sistemas de armazenamento de energia são importantes no aproveitamento desses recursos, assim como na aplicação de redes inteligentes (Smart Grid). Em um cenário com novas demandas, como a dos veículos elétricos, o armazenamento de energia passa a ser uma necessidade, e não somente uma opção para equilíbrio do sistema [5]. Com o aumento da participação da energia eólica na rede, a regulamentação tem forçado para que os parques eólicos atendam a exigentes requisitos de resposta a eventos [6]. O não atendimento pode impor uma redução de capacidade do parque, reduzindo o lucro do empreendedor, ou mesmo impedindo a operação. Os autores demonstram que com armazenamento de energia o sistema pode atender melhor aos requisitos de qualidade, aumentando a lucratividade do empreendimento.

Ainda que tecnologias de armazenamento de energia possam ser aplicadas com sucesso para aerogeradores de pequeno ou médio porte ligados à rede de distribuição, este trabalho versa sobre problemas de conexão de sistemas de grande porte a redes de transmissão de energia.

ESTABILIDADE DE REDE E GERAÇÃO EÓLICA

Estudos de desempenho dos parques eólicos são fundamentais quando conectados a uma rede elétrica AC fraca, pois, nesse caso as características do parque eólico podem afetar de maneira significativa todo o sistema ao qual for conectado [7]. A avaliação do comportamento dinâmico do sistema ante a um



evento imprevisto pode trazer consequências com efeito cascata, que se não for contido pode degradar a rede elétrica até o ponto de ocorrer apagões.

Um aspecto importante a ser abordado é que a operação instável na ocorrência de uma falha não estão somente associados a falta de potência reativa no PCC (*Point of Common Coupling*, ponto de conexão). É evidente que para um PCC fraco, a influência do parque eólico será maior, podendo em alguns casos, dominar a rede AC no ponto de conexão, portanto é importante que um parque eólico forneça uma referência estável para a rede elétrica [7]. Os problemas de parques eólicos conectados a redes fracas geralmente se relacionam a estabilidade. Podem ocorrer flickers de tensão [8] ou ressonância subsíncrona/ressonância de alta frequência quando o sistema eólico está conectado à uma rede fraca com compensação série ou paralela [9]. A relação que indica a estabilidade de um PCC em relação a uma usina geradora de energia é a relação de curto-circuito SCR (*Short Circuit Ratio*), que é definida por:

$$SCR = \frac{S_{CC}}{P_n} \quad (1)$$

onde P_n é a potência nominal do parque eólico e S_{CC} é a potência de curto-circuito da rede. O valor do S_{CC} é obtido por [2]:

$$S_{CC} = \frac{V_n^2}{Z_{CC}} \quad (2)$$

onde V_n é a tensão nominal da rede e Z_{CC} é a impedância de curto circuito. É importante ressaltar que o SCR não é uma medida de todo o sistema elétrico, mas se trata de uma medida de um ponto específico, ou seja, um grande sistema com geradores de linhas de transmissão terá diferentes valores de SCR para diferentes pontos analisados [2]. Embora o SCR seja calculado usando valores de estado estacionário, seu valor é uma medida de quão facilmente as tensões do barramento são afetadas durante os eventos dinâmicos do sistema.

A potência reativa, gerada pelos elementos capacitivos, é diretamente proporcional ao quadrado da tensão, portanto, quando ocorre um afundamento de tensão a potência reativa diminui quadraticamente, ocasionando um efeito cascata que pode levar o sistema a um desequilíbrio. Devido a isso, é utilizado frequentemente o valor eficaz do SCR (*effective short circuit ratio* – ESCR) [10]:

$$ESCR = \frac{S_{CC} - Q_c}{P_n} \quad (3)$$

onde Q_c é a potência reativa de todas as capacitâncias shunt conectadas ao PCC. Em alguns casos, quando um parque eólico é conectado através de longas linhas de transmissão, que naturalmente

possuem alta impedância, o SCR resultante é reduzido e o seu valor é determinado primariamente pelo comprimento da linha. Na Figura 1 pode-se notar que uma alteração da geração do parque eólico acarretará uma variação da corrente (I), e conseqüentemente uma variação de V e V_L . Observa-se que se a impedância de curto circuito (Z_{CC}) tem um valor baixo, a variação de V será pequena e S_{CC} terá um valor elevado, ou seja, a rede é forte [11].

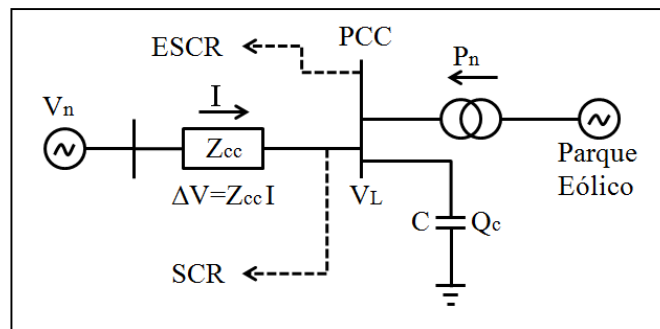


Figura 1 – Representação simplificada (Adaptado de [10]).

Alguns autores convergem quanto a definição de estabilidade da rede [7], [10]:

$SCR > 7$ – Rede forte

$SCR < 3$ – Rede Fraca

$SCR < 1,5$ – Rede muito fraca

Outra definição [12] coloca que além do SCR a relação X_{rede}/R_{rede} (X_{rede} é a reatância e R_{rede} é a resistência da rede) é importante para definição de uma rede fraca, que ocorre quando $SCR < 3$ e $X_{rede}/R_{rede} < 5$.

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Sistemas de armazenamento de energia para fontes renováveis são úteis para estabilização da produção energética. A combinação de geração eólica com armazenamento de energia vem sendo tratado na literatura há muitos anos, mas não é aplicada na prática principalmente por questões de custo [13].

As instabilidades de rede podem ser classificadas como oscilações de baixa, média e alta frequência, definidas no domínio do tempo, com os seguintes limiares propostos [2].

Baixa Frequência: oscilações em períodos maiores que 5min;

Média Frequência: oscilações em períodos menores que 5min e maiores que 10s;

Alta Frequência: oscilações em períodos menores que 10s.

As variações de baixa frequência ocorrem devido a variabilidade do recurso, enquanto as de média frequência, seriam aquelas que podem ser provocadas tanto pela variabilidade da fonte como pelo sistema de captura da fonte primária. No caso de estudo, os problemas de oscilações de alta frequência na geração estão sempre relacionados aos sistemas de conversão de energia eólica, mas também podem ocorrer oscilações de alta frequência provenientes da rede elétrica. A figura 2 mostra o resultado de simulação do resultado que um evento proveniente da rede provoca no sistema, absorvido de diferentes formas em função das alternativas de configuração do parque eólico avaliadas pelos autores [14].

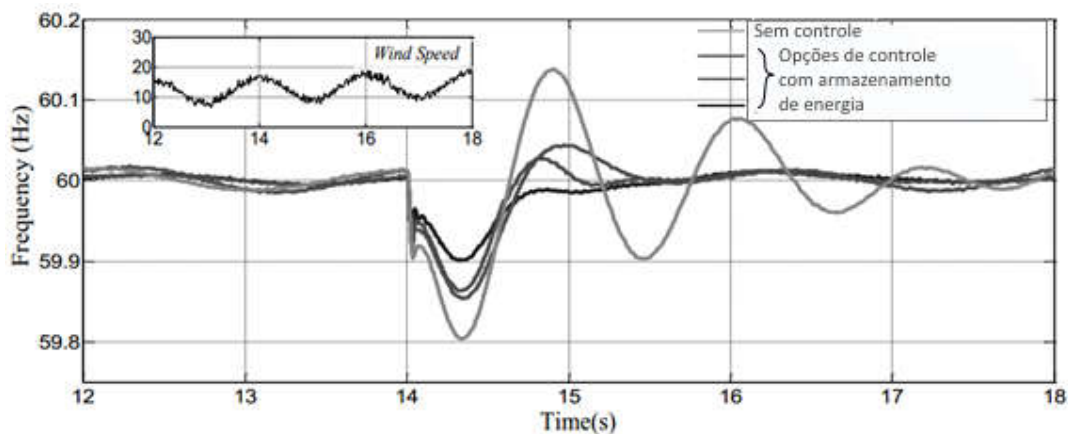


Figura 2 – Resposta dinâmica na frequência considerando alternativas de controle com armazenamento de energia, sob variação de velocidade do vento [14].

As tecnologias usuais para armazenamento de energia convertem a energia elétrica em outra forma de energia, mecânica ou química, mas existem também tecnologias para armazenamento direto de energia elétrica. A Figura 3 mostra como diferentes tecnologias de armazenamento podem ser usadas para controles do sistema elétrico.

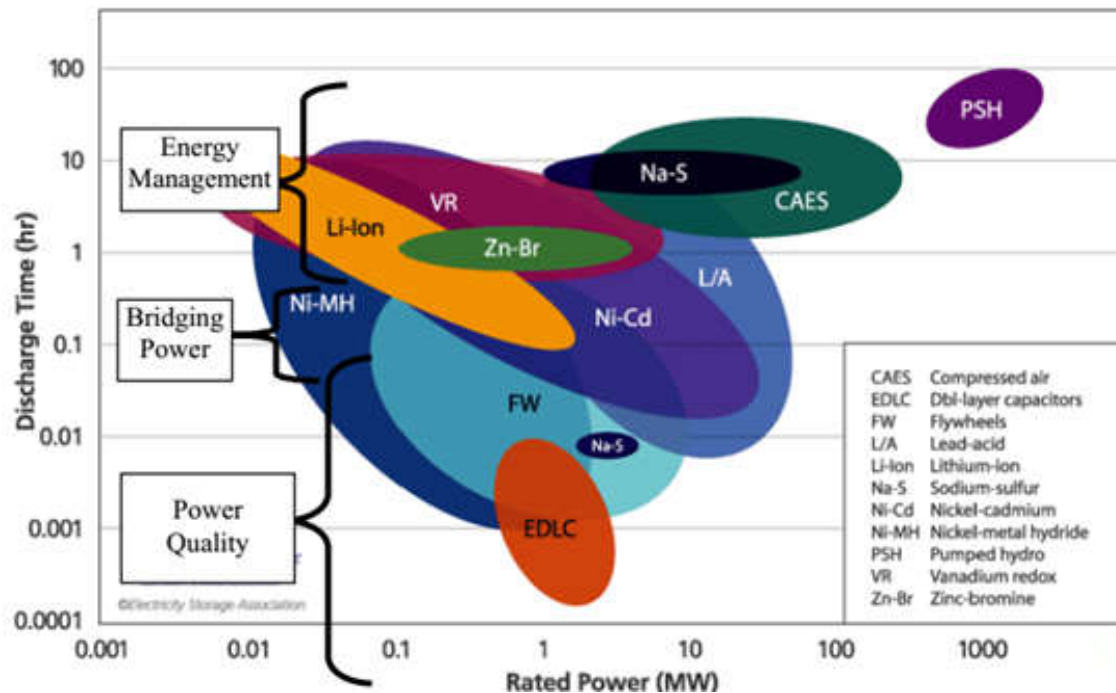


Figura 3 – Avaliação comparativa de tecnologias de armazenamento [15].

Em Nota Técnica a Empresa de Planejamento Energético [16] indica que apoio adequado para a geração eólica necessita de alta potência, mas uma capacidade de acumulação de energia relativamente pequena. A tabela 1 compara algumas tecnologias de armazenamento para atendimento a demandas de alta frequência¹.

Tabela 1 Propriedades das tecnologias de rápido acionamento [13], [17]

Tecnologia	Eff. %	Custo Energia \$/kWh/ano	Custo Potência \$/kW/ano	Densid. Pot. kW/l	Temp o carga	Ciclos/anos durab.
SMES <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>	80 a 90%	370000	59	1 - 4	Seg-min	Sem limite / 20 a
Supercapacitor	86 a 94 %	711	6	Até 15	Seg.	10 ⁶ / 15 a
Flywheel FESS	80 a 95%	96	1,2	Até 10	minutos	10 ⁷ / 15 – 20 a
Bateria Chumbo-acido	63 a 80%	69	91	0,01 – 0,5	Muitas horas	500-2000/ 5 – 15 a (depende da temperatura)

¹ Bateria apresentada como referência

CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS NA LITERATURA

A grande maioria das propostas que se apresentam na literatura para solucionar problemas intrínsecos da geração eólica contemplam alguma forma de armazenamento, a seguir apresenta-se uma síntese.

Tabela 2 – Resumo de proposições pertinentes ao presente estudo.

Autor	Ano	Armazenamento	Detalhes	Figura
[18]	2016	Supercapacitor /Bateria LiFePO4	+STATCOM	4
[19]	2012	Flywheel + Bat. +DSTATCOM	FESS 100 kW / Pn 750 kW	-
[13]	2007	Supercapacitor	ESS 0,5 MW / Pn 1 MW	5
[6]	2016	Supercapacitor / Bateria (VRFB)	Retorno financeiro OK	-
[20]	2016	Flywheel no link AC	Não recomenda STATCOM	-
[21]	2016	Flywheel no link AC	FESS 2 MW / Pn 12 MW	7
[22]	2005	Flywheel no link DC	Multiterminal DC (MTDC)	6
[23]	2015	Flywheel no link DC	FESS 1,5 kW / Pn 7,5 kW	8
[24]	2013	Flywheel no link AC	FESS 0,5 MW / Pn 1,5 MW	9
[25]	2016	Flywheel no link AC	FESS 100 kW / Pn 275 kW	10
[26]	2013	Flywheel no link AC	FESS 22,5 MW / Pn 12 MW	11
[27]	2006	Flywheel no link AC	FESS 0,3 MW / Pn 1 MW	-
[28]	2016	Flywheel	FESS<10% de Pn	-

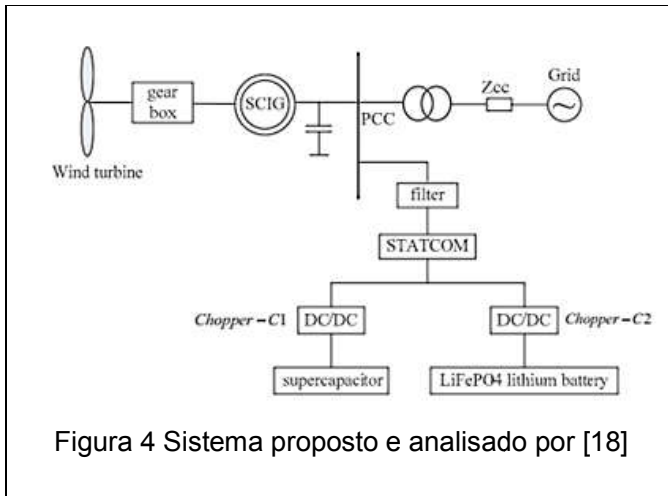


Figura 4 Sistema proposto e analisado por [18]

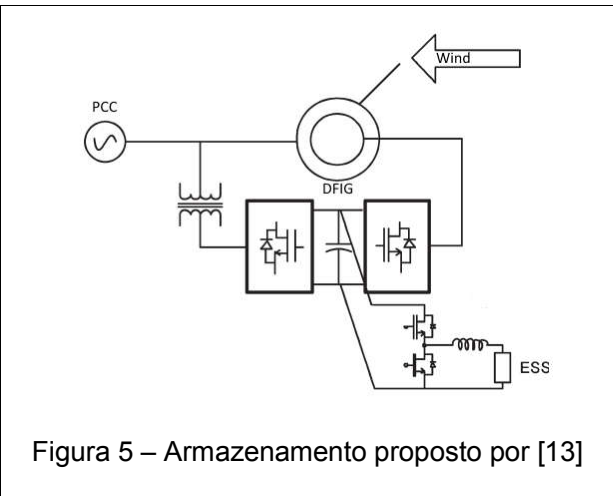


Figura 5 – Armazenamento proposto por [13]

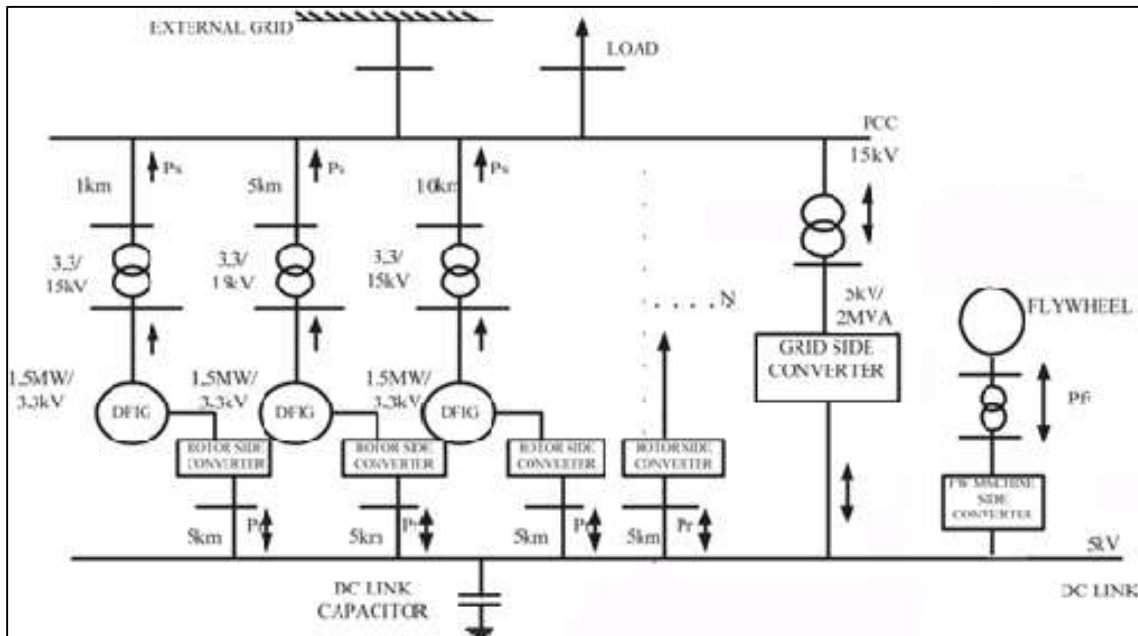


Figura 6 - Esquema simulado com volante inercial [22]

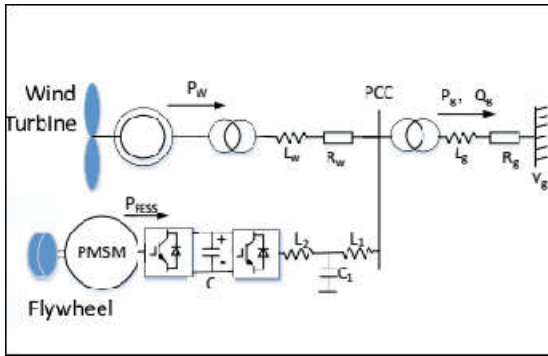


Figura 7 Esquema proposto [21].

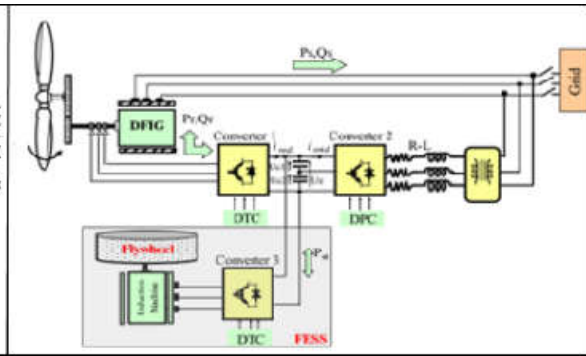


Figura 8 - Configuração estudada - [23].

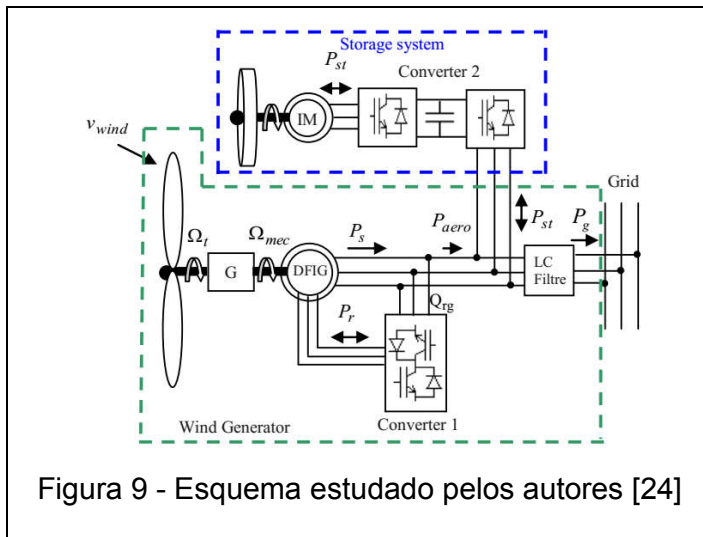


Figura 9 - Esquema estudado pelos autores [24]

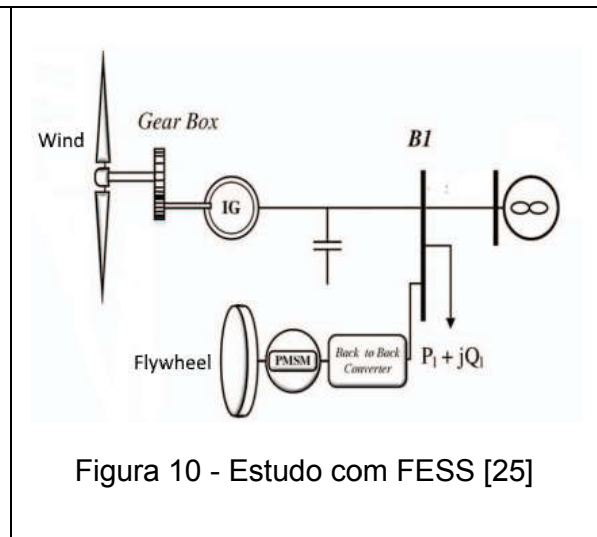


Figura 10 - Estudo com FESS [25]

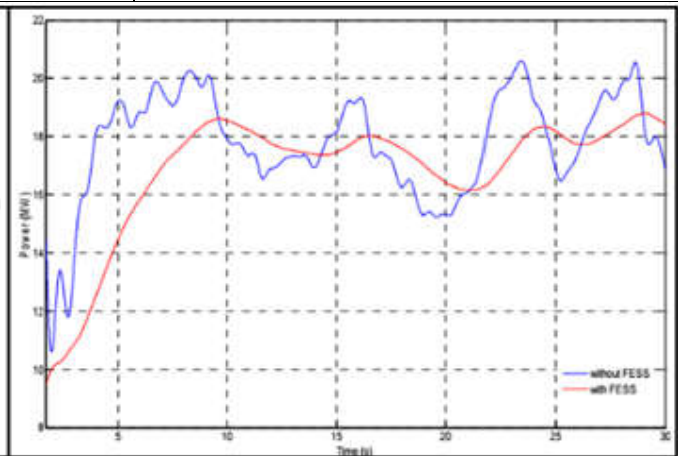
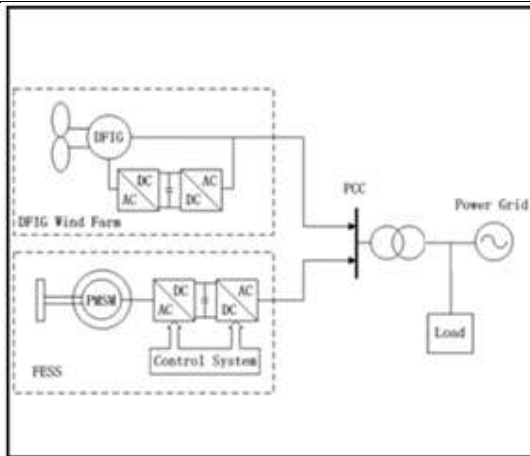


Figura 11 - Esquema estudado e resultado obtido pelos autores[26]



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há indicações (e.g., vide tabela 1) de vantagens de aplicação de volantes inerciais (*Flywheel*, FESS) para melhoria da qualidade de energia gerada em parques eólicos, por questões de confiabilidade, custo, meio-ambiente, espaço e adequação técnica ao problema de estabilidade (10 referências, de [19] a [28]), e existem muitas combinações e arranjos a serem explorados.

Recomendam-se futuros trabalhos em duas áreas, otimização de sistemas e desenvolvimento de parâmetros regulatórios. O desenvolvimento de um sistema de medição intrínseco a um parque eólico que exprima da forma mais direta possível sua capacidade de atender a necessidade de produção de energia em pontos de conexão onde a rede é fraca, ou seja sua capacidade de prover referências estáveis de frequência e tensão para a rede com qualidade estabelecida é uma área onde o conhecimento deve ser desenvolvido para possível determinação de parâmetro regulatório.

A otimização de sistemas deve ser acompanhada de uma análise financeira detalhada, já que obrigatoriamente haverá um custo adicional a ser absorvido, considerando o interesse dos agentes financeiros e empreendedores do setor. Finalmente, deve ser explorada possível sinergia em armazenamento de energia para melhora da qualidade e armazenamento para gerenciamento em *Smart Grid* com grande penetração de geração renovável.



BIBLIOGRAFIA

- [1] EPE , DEE-RE-107 2016 *ESTUDOS DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO – Empreendimentos eólicos* Dezembro 2016
- [2] Golieva, A. *Low Short Circuit Ratio Connection of Wind Power Plants* Master of Science Thesis - TU Delft, 2015
- [3] Hamzahoui, I., Bouchafaa, F. e Talha, A., *Advanced Control for Wind Energy Conversion Systems with Flywheel Storage Dedicated to Improving the Quality of Energy* IEEE 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2015
- [4] Boletim ONS-DPP-REL-0100-2016 - Mensal de Agosto 2016
- [5] Taylor, P., Bolton, R., Stone, D., Zhang, X. P., Martin, C., Upham, P., *Pathways for energy storage in the UK* Centre for Low Carbon Futures, March 2012
- [6] Vaca, S.M., Patsios, C., e Taylor, P., *Enhancing Frequency Response of Wind Farms using Hybrid Energy Storage Systems* 5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. Birmingham, 2016.
- [7] Bassini, M., Horita, M., Jardini, J., e Davies, M. *Assessment of enabling technologies for the connection of wind farms to weak AC networks* CIGRE Science & Engineering, V6, Oct 2016
- [8] Ding, Z., Dong, X., Liu, Y., Zhu, Y., e Shen, H., *Voltage Flicker Assessment of a Weak system Integrated Wind Farm* CIRED 22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, June 2013.
- [9] Song, Y., e Blaabjerg, F. , *Overview of DFIG-Based Wind Power System Resonances Under Weak Networks* IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 32, 6, June 2017
- [10] A. Gavrilović. *AC/DC System Strength as Indicated by Short Circuit Ratios*. Int. Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK. 1991.
- [11] Lirio, F.L. *Curso básico de Energia Eólica – Conexão a rede e Qualidade de Energia* – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL – Eletrobrás. Rio de Janeiro, Outubro 2016
- [12] Martinez, A., *Connecting Wind Power Plants to Weak Grids* VESTAS Wind Industry Forum, 26 March 2015 Disponível em: <<https://www.cleanenergycouncil.org.au/dam/cec/events/archive/2015-wif/Presentations-in-PDF/1.8-Antonio-Martinez/1.8%20Antonio%20Martinez.pdf>>
- [13] Abbey, C., e Joos, G., *Supercapacitor Energy Storage for Wind Energy Applications* IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 43, NO. 3, MAY/JUNE 2007



- [14] Hao, X., Zhou, T., Wang, J., Yang, X., *A hybrid adaptive fuzzy control strategy for DFIG-based wind turbines with super-capacitor energy storage to realize short-term grid frequency support* IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 p. 1914 – 1918
- [15] Denholm, P., Ela, E., Kirby, B. e Milligan, M. *The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation* - Technical Report NREL/TP-6A2-47187 January 2010. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47187.pdf>
- [16] EPE - ESTUDOS DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO – Empreendimentos Eólicos - No EPE-DEE-RE-107/2016-rev0 – 13/12/2016
- [17] Tomczewski, A., *Operation of a Wind Turbine-Flywheel Energy Storage System under Conditions of Stochastic Change of Wind Energy* The Scientific World Journal, Hindawi Publishing, Article ID 643769, Volume 2014
- [18] Lei, L., Shengtie, W., e Guizhen, T., *Grid Power Quality Improvement with STATCOM/HESS for Wind Turbine with Squirrel-cage Induction Generator* IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) 2016
- [19] Suvire, G. O.; Mercado, P. E. *Active power control of a flywheel energy storage system for wind energy applications* IET Renewable Power Generation Year: 2012, Volume: 6, Issue: 1
- [20] Nair, G. S.; e Senroy N. *Power Smoothing using Multi terminal DC based DFIG connection and Flywheel Energy Storage System*. Department of Electrical Engineering. Indian Institute of Technology Delhi. New Delhi, India. 2016.
- [21] Li, J., Bi, J., Yan, G., Ge, Y., e Jin, P., *Research on improving power quality of wind power* 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2016) Xi'an, 10-13 Aug, 2016
- [22] CÁRDENAS, R.; PEÑA, R.; PÉREZ, M.; CLARE, J.; ASHER, G.; WHEELER, P. *Power Smoothing Using a Flywheel Driven by a Switched Reluctance Machine*. University of Magallanes, Department of Electrical Engineering. University of Nottingham, School of Electrical Engineering. 2005.
- [23] Hamzahoui, I., Bouchafaa, F. e Talha, A., *Advanced Control for Wind Energy Conversion Systems with Flywheel Storage Dedicated to Improving the Quality of Energy* IEEE 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2015
- [24] Taraff, S., Rekioua, D., e Aouzellag, D., *Wind Power Control System Associated to the Flywheel Energy Storage System Connected to the Grid* Energy Procedia 36 (2013)



- [25] Iranmesh, S.; Fadaeinedjad, R. *Using Flywheel Energy Storage System to Mitigate Voltage and Power Fluctuations Due to Aeroelastic Aspects of Wind Turbines*. 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Kerman, Iran. 2016.
- [26] Wang, J. C., e Wang, X. R., *A Control Strategy for Smoothing Active Power Fluctuation of Wind Farm with Flywheel Energy Storage System Based on Improved Wind Power Prediction Algorithm* Energy and Power Engineering, 5, 2013 < <http://www.scirp.org/journal/epe>>
- [27] Cimuca, G. O.; Saudemont, C.; Robyns, B.; Radulescu, M. M. *Control and Performance Evaluation of a Flywheel Energy-Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 4, August 2006.
- [28] Abdeltawab, H. H., e Mohamed, Y. A. R. I. , *Robust Energy Management of a Hybrid Wind and Flywheel Energy Storage System Considering Flywheel Power Losses Minimization and Grid-Code Constraints* IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 63, NO. 7, JULY 2016

BIOGRAFIAS

Antonio Carlos de Barros Neiva – Nasceu em São Paulo, SP, em 09/06/1965. Graduado em Engenharia Mecânica, na modalidade Potência e Gás, em 1981 na UNICAMP, tendo também Mestrado no Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos da mesma instituição em 1996; e MBA na Fundação Getúlio Vargas em 2008, em Gestão de Empreendimento com ênfase em Planejamento.

Neiva atuou como especialista em chão de fábrica e em Engenharia de Processos em indústrias de diversos segmentos, assim como foi empresário, e coordenou projeto de pesquisa FAPESP/PIPE. Atualmente é Pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da ELETROBRÁS, o CEPEL, no grupo de Energia Eólica do Departamento de Tecnologias Especiais.

Igor Jasmim da Nóbrega – Nasceu no Rio de Janeiro, RJ, em 12/04/1993. Graduado em Engenharia Elétrica, em 2016 na UNESA, realizou iniciação científica no Laboratório de Sistemas de Detecção no CBPF e é Técnico em Eletrotécnica.

Atuou como Técnico de Projetos Elétricos desenvolvendo projetos de quadros e painéis elétricos. Além disso, foi estagiário de engenharia elétrica na área de fontes renováveis no CRESESB/CEPEL. Atualmente, é aluno de mestrado na área de Sistemas de Energia Elétrica na UFRJ e bolsista no CEPEL.