



## Atualidades na Geração Eólica Síncrona sem Conversão CA/CC

Antonio Carlos de Barros Neiva<sup>1</sup> e Fabricio Lucas Lirio<sup>1</sup>

1 - CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - ELETROBRAS

Av. Horácio Macedo 354, CEP 21941-911, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

neiva@cepel.br , fabricio@cepel.br

### Resumo:

Esta revisão da literatura apresenta uma relação entre uma nova tecnologia de conversão da energia aplicada na nacela de um aerogerador, e um problema proveniente do aumento da penetração de energias renováveis. A tecnologia citada pode contribuir na solução deste problema, relacionado à estabilidade das redes de transmissão e distribuição de energia, invertendo a atual situação e tornando o parque eólico um elemento colaborador, provedor de inércia para estabilização da rede elétrica.

**Palavras-chave:** Aerogerador, *M-CVT*, *DFIG*, Estabilidade de Rede.

### 1. INTRODUÇÃO

O crescimento da geração de energias renováveis é a estratégia mais eficiente para redução de emissão de gases de efeito estufa e combate ao aquecimento global. O aumento da penetração destas fontes de energia deve continuar, tanto no Brasil como no mundo. Por este motivo se justificam esforços para evitar possíveis barreiras ao crescimento da geração das energias eólica e solar, fundamentais para o desenvolvimento sustentável da sociedade. Este crescimento traz consigo problemas específicos ainda não resolvidos, e neste trabalho trata-se daqueles relativos à estabilidade da rede [1-3]. Faz-se necessário registrar que o problema ora tratado não se refere à variabilidade natural do recurso eólico, que se dá em intervalos de tempo tipicamente maiores (minutos ou horas), enquanto que os intervalos relevantes para a estabilidade da frequência da rede elétrica são significativamente menores.



No caso da Energia Eólica, a estabilidade das redes de transmissão é afetada principalmente quando há um número considerável de usinas gerando em uma região onde a rede é considerada fraca [2], no aspecto de potência de curto-circuito. Por exemplo, quando há uma perda de potência ativa, como na imediata saída de um gerador do sistema, ocorre uma queda da frequência [4], que não pode ser compensada pelos aerogeradores. A solução para esta limitação, principalmente em regiões onde existe grande disponibilidade do recurso eólico, configura um desafio tecnológico relevante [1].

Face às características particulares do Sistema Interligado Nacional (SIN), com intercâmbio de grandes blocos de energia a longas distâncias, é fundamental para a segurança operacional garantir que os parques eólicos sejam suficientemente robustos para suportar os impactos dinâmicos de perturbações sistêmicas bem como contribuir para o controle das tensões e da frequência [1, 5].

Uma forma de apresentação do problema pode começar pela análise da evolução histórica da geração eólica para fins comerciais. Durante as décadas de 70 e 80, o tipo de aerogerador mais empregado ficou conhecido como modelo holandês [6], que tem rotação fixa e gerador de indução acoplado diretamente a uma rede forte. Neste caso, a rede impõe a rotação síncrona do gerador, em função do número de polos da frequência da rede, e do escorregamento.

Apenas em anos recentes com o progresso da eletrônica de potência, a utilização de aerogerador com rotação variável tornou-se viável [7], aumentando significativamente sua eficiência aerodinâmica.

## **2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA**

Além de aumentar a eficiência aerodinâmica por permitir rotação variável, a eletrônica de potência tem finalidades de adaptação da energia gerada ao padrão de qualidade da rede. O sistema de controle tem vantagens relativas ao custo dos equipamentos, mas apresenta eficiência elétrica limitada, e pode introduzir distorções harmônicas na rede [8], além de reduzir a inércia global do sistema. Segundo especialistas do ONS [9], esta característica representa uma grande ameaça à segurança do sistema, principalmente nas regiões onde está prevista uma elevada penetração das centrais eólicas. A falta de inércia associada a este tipo de geração é

fator preponderante para que o problema assuma dimensões importantes, que podem impedir a operação para evitar evento de queda em cascata de blocos da rede [2].

As unidades geradoras devem ter capacidade de suportar variações de frequência relativamente grandes que ocorrem, por exemplo, durante a abertura de um elo de interligação. Neste caso, até que as ações promovidas pelo sistema, seja de rejeição de carga (no caso de subfrequência) ou de corte de geração (no caso de sobrefrequência), a manutenção da rede estável é de importância vital para a sobrevivência da área ilhada [10].

Os curtos-circuitos nas redes de transmissão são eventos relativamente frequentes, e muitas vezes são causados pelos próprios aerogeradores [11], portanto a preocupação em manter a rede estável é uma realidade cotidiana. Existem ainda relatos internacionais de grande incidência de falhas nos sistemas de eletrônica de potência dos aerogeradores [12] e nas caixas de transmissão [12, 13], e que estes componentes são responsáveis por impactar no preço da energia, por motivos de custos iniciais, manutenções, e paradas dos sistemas.

O ONS aponta que a gestão dos parques geradores de energia eólica no país, concentrados majoritariamente nas regiões Nordeste e Sul, bem como a perspectiva de seu crescimento na matriz eletroenergética do Sistema Interligado Nacional (SIN), representa um grande desafio para o Operador [14]. Em face deste desafio, o ONS vem empreendendo uma série de ações regulatórias estabelecendo metodologias para atendimento aos desequilíbrios do sistema. Os Procedimentos de Rede em vigor estabelecem limites para a operação de parques eólicos frente a desvios de frequência da rede em aerogeradores de centrais eólicas com potência instalada superior a 10 MW [15].



Figura 1 - Faixas de operação da central geradora em regime de frequência não nominal [15].

O procedimento define ainda diversos parâmetros e modos de operação, como o apresentado na figura 1, assim como define condições para o uso de inércia sintética.

Os dois tipos de geradores elétricos mais empregados atualmente para energia eólica são o gerador síncrono de imã permanente (PMSG, *Permanent Magnet Synchronous Generator*), onde 100% da energia gerada é transformada em corrente contínua, e posteriormente é convertida em corrente alternada por um inversor de frequência, e o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG, *Doubly Fed Induction Generators*), no qual parte da energia passa por conversão CA-CC-CA e parte é alimentada diretamente para a rede elétrica, como mostrado na figura 2.

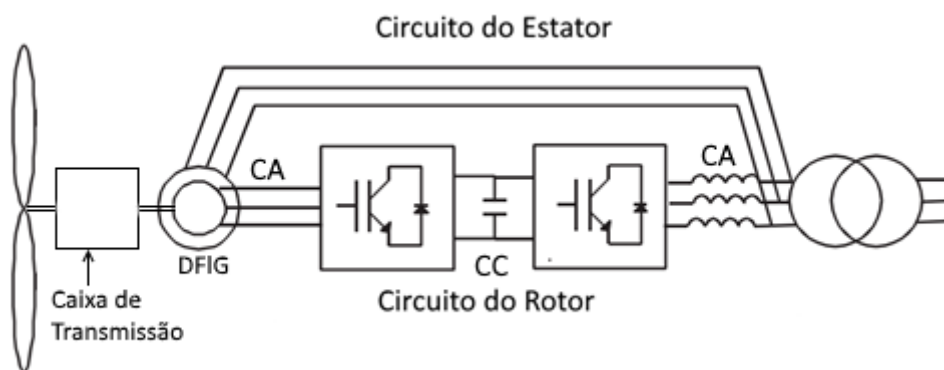


Figura 2 – Esquema elétrico de gerador DFIG [6].

A vantagem do gerador DFIG em relação ao PMSG dá-se por motivos econômicos, já que somente parte da energia (20 – 30%) precisa ser convertida através do chamado link CC [16]. Além deste há outros atrativos, que torna a tecnologia DFIG a mais usada na atualidade. Entretanto existe uma grande preocupação quanto a sua capacidade de atendimento aos requisitos de qualidade de energia no caso de falha da rede [17]. Segundo o autor, no caso de falha ou problema na rede, a tensão nos terminais diminui, a rotação sobe muito rapidamente, assim como a corrente, tornando o sistema instável. Por este motivo, afirma que é necessário encontrar uma solução adequada para compatibilizar a geração eólica com DFIG para suporte a transientes de baixa voltagem (LVRT, *Low Voltage Ride Through*), e as alternativas tecnológicas pelo autor analisadas demandam altos investimentos.

Em trabalho recente [18] foram publicados resultados de simulação dinâmica (com o software ANATEM®), considerando um sistema de geração composto por um parque eólico com 40 aerogeradores DFIG e potência total de 32MW, e um gerador síncrono de 520MVA, alimentando

uma carga de 334MW. A análise é realizada a partir de um momento quando ocorre uma súbita elevação de 10% da carga. Foram analisados vários cenários avaliando a resposta do sistema com e sem inércia sintética. A figura 3 mostra a resposta de frequência no sistema para um caso determinado. Em outros cenários, o resultado da inércia sintética foi ainda menos eficaz do que no caso aqui apresentado.

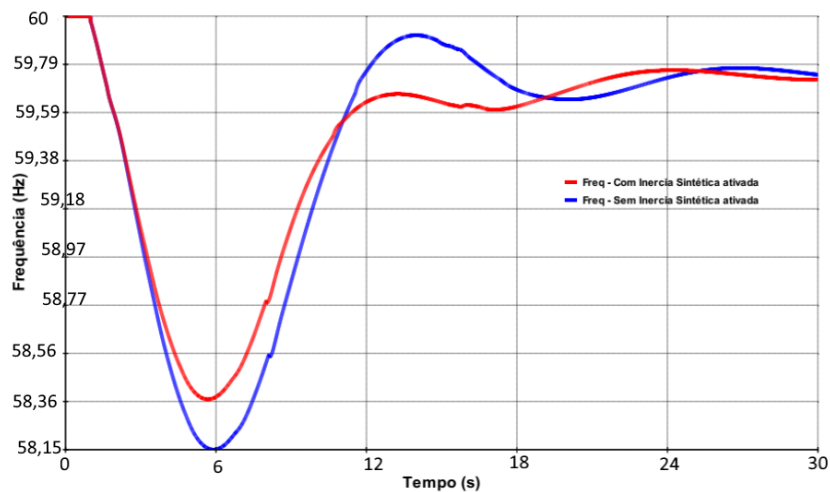


Figura 3 – Comportamento de frequência para parque com 40 aerogeradores DFIG [18]. Observa-se que a inércia sintética injeta potência em um primeiro momento, para que a redução na frequência não seja tão elevada. Como pode ser visto na figura 4, existe uma recuperação de parte da energia que foi injetada após 11s, de forma a amortecer o processo de estabilização da frequência.

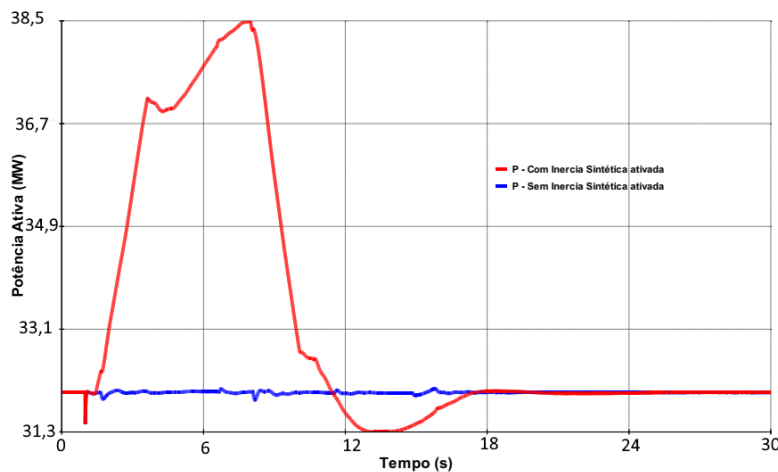


Figura 4 – Comportamento de potência para parque com 40 aerogeradores DFIG [18]. Recentes informações [19] apontam a ressonância subsíncrona em redes alimentadas por aerogeradores DFIG como causa para diversos incidentes que vem ocorrendo na região de



Guyuan, no norte da china. Este tipo de problema também é citado como a causa do acidente ocorrido no Texas em 22/10/2009 [20], quando alguns aerogeradores foram danificados com perda de seu sistema elétrico. Outros autores [21] citam este mesmo problema como causa do desligamento de grande número de aerogeradores para reestabelecimento do padrão de qualidade da rede elétrica.

Um relatório apresentado pelo NREL [22] indica que a reserva inercial girante pode ser uma boa solução para o problema de estabilidade de rede com alta penetração de energias renováveis. Sem a inércia, o sistema demora mais para se recuperar de um evento relacionado a frequência, podendo levar ao colapso do sistema. Fontes de energia com massa girante relativamente grande, que tem resposta inercial síncrona, corrigem automaticamente eventos que desestabilizam a frequência do sistema [23]. Quanto maior o momento de inércia da massa girante, mais rápida será a recuperação do padrão de frequência, e menor a chance de colapso do sistema. A inércia mecânica giratória está presente principalmente na geração hidroelétrica, mas também na termoelétrica, e isto veio a possibilitar ao Brasil construir um sistema nacional integrado único e integrado, com dimensões continentais. A proposta que se apresenta neste trabalho tem como finalidade trazer esta característica à geração eólica, fornecendo diretamente o momento de inércia dos corpos girantes, rotor aerodinâmico e gerador de energia, como elemento de estabilização da rede.

Existe uma proposta [24] de o aerogerador operar com uma velocidade de ponta de pá um pouco acima da ideal, transferindo energia e inércia adicional disponível para a rede em um evento de curto circuito, diminuindo um pouco a velocidade de rotação. Entretanto, segundo uma análise apresentada [23] sobre este sistema, este procedimento envolve redução de eficiência da operação, e estes custos devem ser avaliados e discutidos entre os envolvidos. Ainda assim os autores consideram que esta seja uma alternativa de controle viável e que deve ser estudada.

### **3. TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE VARIÁVEL (CVT) NA ENERGIA EÓLICA**

As caixas de transmissão tradicionalmente aplicada nos aerogeradores, que usam engrenagens convencionais, apresentam relação de transmissão fixa entre o eixo de entrada e o de saída. O desenvolvimento de caixas de transmissão com relação de transmissão variável (CVT, *Continuous Variable Transmission*) deu-se principalmente para aplicações automotivas. Ao invés

das engrenagens, estes sistemas usam transmissão por atrito, principalmente através de correias sobre polias cônicas, ou de esferas entre discos [25, 26]. Observa-se um uso cada vez maior do CVT em automóveis, não só por melhoria de desempenho e durabilidade do motor, como para redução de emissão de gases de efeito estufa [26].

Desde o final da década de 80 [27] surgem estudos para aplicação de CVT na geração de energia eólica, compatibilizando as variações de rotação do eixo primário do aerogerador, com uma rotação constante no eixo secundário que é acoplado ao gerador elétrico. Segundo a empresa Japonesa *Gear Chain Industrial B.V.*, fabricante de CVT, “*Application of a CVT in a wind turbine has long been a dream of wind turbine developers*”<sup>1</sup>.

O sistema de controle de um aerogerador tem a função de buscar o rendimento ideal para cada situação, e isto é feito por um algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). A figura 5 apresenta uma curva típica de MPPT, onde o sistema procura sempre operar com a combinação ideal de RPM e ângulo de passo ( $\beta$ ) para obter o melhor  $C_p$  para determinada velocidade do vento. A informação da curva do MPPT fornece também, indiretamente, as rotações máxima e mínima de operação, e esta é uma informação importante para dimensionamento de um CVT.

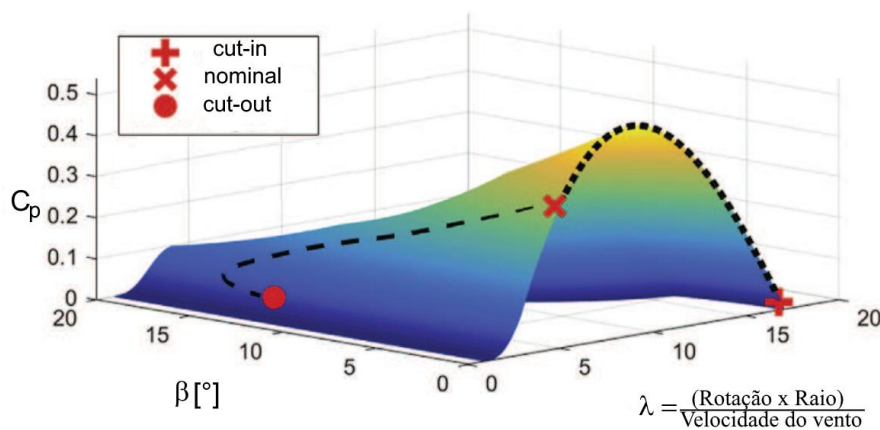


Figura 5 – Curva MPPT de aerogerador [28].

As duas características mais relevantes para especificação de um CVT são a relação de transmissão máxima e mínima, e o torque máximo suportado [28]. As relações máximas e mínimas encontradas na literatura pesquisada estão apresentadas na tabela 1. Este levantamento, para aerogeradores de 800kW a 5 MW, contém dados de 10 aerogeradores publicados em 2009 [8], e outros 10 investigados em pesquisa realizada em diversas fontes.

<sup>1</sup> <http://www.gcinet.nl/en/news/4-gci-starts-development-on-wind-turbine-cvt>

Tabela 1 - Relações entre rotações máximas e mínimas para 20 aerogeradores.

	RPM Media	RPM Max.	RPM Min.
Acoplamento Direto (6)	2,8	3,9	1,1
Caixa de Engrenagens (14)	1,9	3,0	1,2
Média Geral	2,2	3,9	1,1

Segundo um trabalho de 2018 [26], o uso de transmissão variável pode aumentar a produção energética entre 7% e 8,5%, principalmente em locais com ventos mais fracos, devido a maior flexibilidade de ajuste das condições de operação do aerogerador. Os autores concluem também que, para o caso estudado, a taxa de transmissão maior deve ser aproximadamente três vezes superior que a taxa de transmissão menor.

Um estudo nacional [29] apresenta uma aplicação de CVT em aerogerador de médio porte (300kW) e no modelo desenvolvido para demonstração usou relação de transmissão maior 3,46 vezes maior que a relação mínima, e concluiu ser possível obter um ganho médio de 10% de potência gerada com configuração com CVT. Este estudo aponta ainda que os ganhos são maiores na medida em que se apliquem a aerogeradores de maior porte, e isto é ratificado por um trabalho posterior [30].

Segundo [27], a aplicação do CVT em geradores eólicos é motivada essencialmente pelo aumento da faixa de rotação do rotor da turbina, tornando possível sua operação em velocidade de maior eficiência. Esta característica potencializa a aplicação do CVT em geradores de alta confiabilidade como os síncronos de ímã permanente e os assíncronos de indução, com rotor em gaiola, apresentando benefícios como a redução dos custos de manutenção e eletrônica de potência [8, 25].

Um trabalho sobre aplicação de CVT em helicópteros [31] considera que as tecnologias CVT com base em atrito, como as apresentadas até este capítulo, não são indicadas para aplicações com exigências severas de uso, devido à baixa confiabilidade, alto custo de manutenção, vibração e eficiência limitada. Talvez por estes motivos, apesar das vantagens apresentadas, ainda não existem aerogeradores comerciais que fazem uso de CVT.



#### 4. CVT MAGNÉTICO E SUA APLICAÇÃO NA GERAÇÃO EÓLICA

Acoplamentos e transmissões magnéticas são dispositivos que se caracterizam por não haver contato mecânico entre os eixos de entrada e de saída. A transmissão do torque é realizada exclusivamente através de efeitos magnéticos.

A tecnologia de acoplamentos magnéticos e caixas de transmissão magnéticas (MG, *Magnetic Gears*) vem sendo desenvolvida desde 1901, mas somente em torno de 2010 o número de publicações científicas a respeito teve crescimento notável [13]. Uma característica importante do acoplamento magnético traduz-se no torque máximo que o acoplamento suporta. Segundo estes autores, a densidade de torque que um MG concêntrico suporta vai de 70 a 150 kNm/m<sup>3</sup>. As caixas de transmissão magnéticas (MG) naturalmente são precursoras das caixas de transmissão magnéticas continuamente variáveis (M-CVT, *Magnetic Continuous Variable Transmission*).

A partir de 2011 surgem as primeiras publicações sobre as M-CVT, destacando-se o trabalho desenvolvido na Universidade de Sheffield [32], que inclui nos estudos aplicação na geração de energia eólica. Este trabalho teve continuidade mercadológica, com produtos atualmente disponibilizados pela empresa Magomatics. Em um trabalho subsequente da mesma equipe [33] é apresentada a configuração da M-CVT na nacelle do aerogerador, com geração síncrona e sem necessidade de inversores e compensadores de alta potência. Entretanto dentre as vantagens citadas, não foi considerado o ganho de estabilidade pela transferência da inércia mecânica para a rede elétrica.

Trabalhos mais recentes aplicando a M-CVT na geração eólica vêm se desenvolvendo na Universidade de Novosibirsk (Rússia), onde os autores têm estudado o sistema para manter a rotação síncrona do gerador, garantindo estabilidade para a rede [34, 35]. Os autores apresentam simulações com resultados, para algumas configurações, como a apresentada na figura 6.

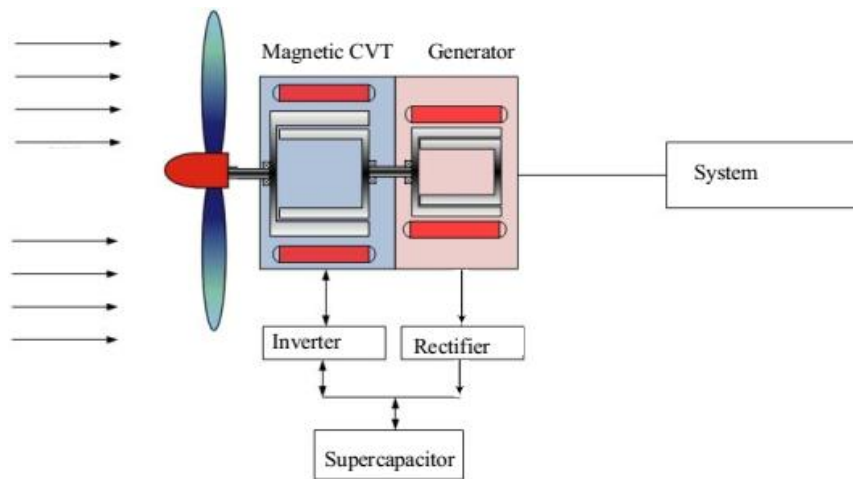


Figura 6 – Aero gerador com M-CVT e gerador síncrono [35]

O sistema de controle do aerogerador apresentado na figura 6, com base no MPPT, deve controlar também a taxa de transmissão do M-CVT. Desta forma, o sistema tem como objetivo não somente o de trabalhar no ponto de máxima eficiência da curva apresentada na figura 5, como também de atender aos padrões de qualidade da energia produzida, principalmente no caso de eventos súbitos na rede elétrica, de forma a colaborar ativamente no reestabelecimento da estabilidade do sistema.

Os autores [35] demonstram diversas vantagens desta configuração, que permite acoplamento a gerador síncrono diretamente conectado à rede elétrica. Ponderam ainda que pode haver problema de ressonância, que deve ser investigado com maior profundidade.

Mais uma configuração que se apresenta é a integração do gerador com a transmissão M-CVT em uma só máquina elétrica, acionada com uma rotação que pode variar, mas com capacidade de geração síncrona de frequência constante. As primeiras configurações de máquinas elétricas integradas com este tipo de transmissão surgiram na primeira década deste século [13]. Mais recentemente foi proposta uma configuração de gerador Vernier – M-CVT [36], apresentada na figura 7, que aparentemente tem vantagens não só em custo e tamanho do equipamento, como também tem melhor controle de harmônicos, segundo os autores.

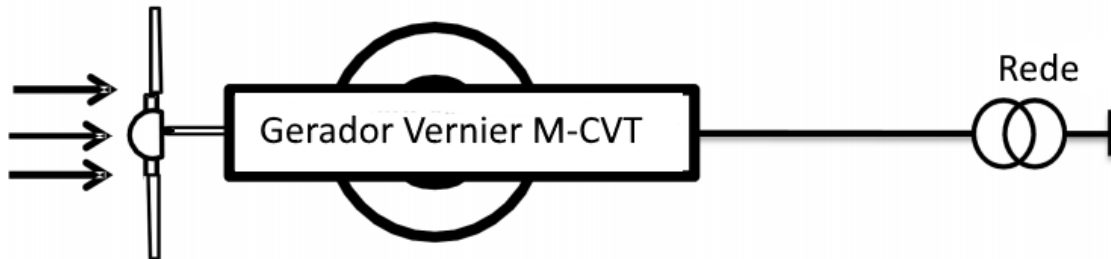


Figura 7 – Integração gerador-transmissão proposta para sistema eólico [36].

Ressalta-se que esta configuração não significa a justaposição de um M-CVT a frente de um gerador, mas sim uma integração efetiva dos campos magnéticos girantes, em uma mesma carcaça.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que o parque eólico forneça uma referência estável de energia para a rede, ao invés de depender desta para estabelecimento de seus parâmetros de controle [2], foi apresentada a solução presente na literatura recente que transfere diretamente inércia mecânica girante para inércia da rede elétrica, permitindo desta forma, o crescimento da geração de energia elétrica de fonte eólica.

Devido ao elevado grau de inovação envolvido, ainda não existem sistemas instalados para demonstração da eficácia da tecnologia apresentada. A tecnologia de acoplamentos magnéticos apresenta grande potencial, mas ainda não está claro que esteja pronta para algumas aplicações industriais [13]. Ainda assim, deve ser explorada a vantagem de ter um sistema de controle da geração que não depende basicamente dos parâmetros da rede para estabelecimento da operação, e sem a necessidade de um link de corrente contínua e complexos sistemas complementares de controle.

Futuros trabalhos devem investigar possíveis arranjos e combinações de tecnologias, inicialmente através de simulações numéricas, e passando por protótipos de bancada, até chegarem às nacelles de aerogeradores. Desafios certamente surgirão no processo de desenvolvimento desta tecnologia, mas ainda assim esta é uma possibilidade a ser investigada pelas vantagens e relativa simplicidade que apresenta.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ferreira, F.M.C. Gaspar, A.R., Filho, A.C.M.M. , Neto, A.S. , Menezes, C.M.C.D.L. ,Sobral, F.R., Melo, K.C.V.D. ,Vasconcelos, L.F.B. , Souto, M.F. , Quintao, P.E.M. Estudos e Soluções para Integração de Usinas Eólicas em Redes Fracas \ Experiência do Planejamento da Operação *XXIV SNPTEE* Curitiba, 2017.
- [2] 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*
- [3] 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) Xi'an, 2016*
- [4] Wang, S., Hu J., Wang, S., Tang, H., Chi, S., Comparative study on primary frequency control schemes for variable-speed wind turbines *IEEE J. Eng., 2017, Vol. 2017, Iss. 13, pp. 1332–1337 The 6th International Conference on Renewable Power Generation Oct. 2017*
- [5] Neiva, A.C.B., e Jasmim, I., Melhoria na Qualidade da Energia Produzida por Sistemas Eólicos com Armazenamento de Energia: Portfólio de Alternativas *Brazil Windpower 2017*
- [6] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., e Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, Chichester: *John Wiley & Sons*, 2001
- [7] Hau, E. Wind Turbines *Springer-Verlag*, Berlin, 2006
- [8] Verdonschot , M.J., Modeling and Control of wind turbines using a Continuously Variable Transmission *MSc Thesis, Eindhoven University of Technology, Department Mechanical Engineering*, April, 2009
- [9] Sardinha, S.L.D.A.; Cisneiros, S.J.N.; Botelho, M.D.J.; Gomes, P.; Brasil, D.D.O.C.; Medeiros, F.D.C.; Bianco, A.; Quintao, P.E.M.; Barbosa, A.D.A.; Medeiros, .A.D.R Aperfeiçoamento dos Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão De Centrais Geradoras Eólicas ao Sistema Interligado Nacional *XXIII SNPTEE* Foz do Iguaçu, 2015
- [10] Gomes, Paulo et al. (+14) Uma Visão Geral Sobre as Questões Relacionadas com a Integração e Operação de Usinas de Energia Eólica no Sistema Elétrico Interligado Nacional – SIN *XXIV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica* Curitiba, 2017.



- [11] Rufato Jr., E., Sganzerla, L. M. B., e Veiga, W., A Influência, Sob O Aspecto De Curto-Circuito, De Geradores Eólicos No Sistema Elétrico De Potência *XXIV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica* Curitiba, 2017.
- [12] Alkan, D., Investigating CVT as a Transmission System Option for Wind Turbines *KTH Industrial Engineering and Management* MSc Thesis, Stockholm, 2011
- [13] Tlali, P. M., Wang, R-J., e Gerber, S., Magnetic Gear Technologies: A Review *IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, nov. 2014
- [14] ONS — VOTO do RELATOR: Diretor Tiago de Barros Correia. Documentação da Audiência Pública 021/2018, relativa ao Leilão de A-6 de 2018 (nº 03/2018).
- [15] ONS – Procedimentos de rede– *Submodulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão* - 2016
- [16] Alsmadi, Y. M., Xu, L., Blaabjerg, F., Ortega, A. P., Abdelaziz, A., Y., Wang, A., and Albatineh, Z., Detailed Investigation and Performance Improvement of the Dynamic Behavior of Grid-Connected DFIGBased Wind Turbines under LVRT Conditions *IEEE Transactions on Industry Applications* Mai. 2018
- [17] Hossain, E. M., Performance of new solid-state fault current limiter for transient stability enhancement of DFIG based wind generator *IEEE Power Symposium (NAPS)*, 2017
- [18] Valença, R.B., Ramos, A.J.P., Filho, J.S.V.N., e Sena, D.J.G., Avaliação do uso da Inércia Sintética de Parques Eólicos para Mitigar Eventos de Grandes Variações de Frequência no Sistema *XXIV SNPTEE* Curitiba, 2017.
- [19] Chen, W., Xie, X., Wang, D., Liu, H., Probabilistic Stability Analysis of Subsynchronous Resonance for Series-Compensated DFIG-Based Wind Farms *IEEE Transactions on Sustainable Energy* V 9, 1, Jan. 2018
- [20] Adams, J., Carter, C., e Huang, S-H., ERCOT Experience with Sub-Synchronous Control Interaction and Proposed Remediation *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2012 IEEE PES



- [21] Wang, L., Xie, X., Jiang, Q., Liu, H., Li, Y., e Liu, H., Investigation of SSR in Practical DFIG-Based Wind Farms Connected to a Series-Compensated Power System *IEEE Transactions on Power Systems*, V. 30, 5, Sept. 2015
- [22] USDOE The Voice of Experience- Integrating Intermittent Resources -What Utilities are Learning *NREL*, 2017
- [23] Califórnia ISO 2016 Califórnia Independent System Operator Corporation - Frequency Response Phase 2 – *Issue Paper* December 15, 2016
- [24] Aho, J., Buckspan, A., Laks, J., Jeon, Y., Dunne, F., Pao, L., Fleming, P., Churchfield, M., and Johnson, K., Tutorial of Wind Turbine Control for Supporting Grid Frequency Through Active Power Control *American Control Conference Montreal*, NREL/ CP-5000-54605,
- [25] Cotrel, J., Assessing the Potential of a Mechanical Continuously Variable Transmission *NREL/TP-500-36371* 2004
- [26] Caivc, M. V., Pencic, M. M. e Zlokolica, M. Z., Adaptive Continuously Variable Transmission used for Maintaining Stationary Regime of Driving Machine *Thermal Science* 20, 2, 2016
- [27] Mangialardi, L.e Mantriota, G., The advantages of using continuously variable transmissions in wind power systems *Renewable Energy* V 2, Issue 3, June 1992
- [28] Nejadkhaki, H. K, Chaudhari, S., e Hall, J. F., A design methodology for selecting ratios for a variable ratio gearbox *Renewable Energy*, 118 ; 2018
- [29] Ribeiro, Felipe Estudo da aplicação de transmissão continuamente variável (CVT) em geradores eólicos de médio porte *Diss. M.Sc., UFABC*, 2010
- [30] Yin, X., An up to date review of continuously variable speed wind turbines with mechatronic variable transmissions *Intl. J. Energy Research*, Dec 2017
- [31] Hameer, S., A Comparative Study and Application of Continuously Variable Transmission to a Single Main Rotor Heavy Lift Helicopter *PhD Thesis, Georgia Inst. of Tech., USA*, 2009
- [32] Wang, J., Atallah, K., e Carvley, S. D., A Magnetic Continuously Variable Transmission Device *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, oct. 2011



- [33] Atallah, K., Wang, J., Carvley, S. D., e Duggan, S., Design and Operation of a Magnetic Continuously Variable Transmission *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48, 4, 2012
- [34] Udalov, S., Achitaev, A. A., e Pristup, A. G., Improving Dynamic Stability of a of Wind Turbine Using Magnetic Continuously Variable Transmission *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, IEEE, Omsk, 15-17 Nov. 2016.
- [35] Udalov, S., Pristup, A. G., Achitaev, A. A., Bochenkov, B. M., e Pankratz, Y. V., Using a Magnetic Continuously Variable Transmission for Synchronization of Wind Turbine Generators Under a Variable Wind Speed *IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines* Omsk, 14-16 Nov. 2017.
- [36] Zaini, A., Niguchi, N. E Hirata, K., Continuously Variable Speed Vernier Magnetic Geared Generator *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Set. 2014.

## BIOGRAFIA

**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 na mesma instituição em 1996; e MBA na Fundação Getúlio Vargas em 2008. Atuou como Engenheiro de Processos, Chefe de Produção e Gerente de Engenharia, assim como foi empresário, e coordenou projeto de pesquisa PIPE - FAPESP. Atualmente é Pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da ELETROBRÁS, o CEPEL, no grupo de Energia Eólica do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar - DME.

**Fabricio Lucas Lirio** - Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1998), mestrado na mesma instituição (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2007). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Tem experiência na área de estudos técnicos para sistemas de potência e modelagem de dispositivos de eletrônica de potência. Atuando em estudos de regime permanente, curto circuito, estabilidade eletromecânica, transitórios eletromagnéticos e harmônicos. Realiza pesquisas na área de modelagem de dispositivos de eletrônica de potência para análise de regime dinâmico de sistemas de potência. Gerente do Projeto de Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM - do CEPEL.