



Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES

Aerogerador com transmissão CVT magnética - Sinergia para solução de problemas

**ANTONIO CARLOS DE BARROS NEIVA(1); FABRICIO LUCAS LIRIO(2); GEORGE ALVES SOARES(3);
CEPEL(1);CEPEL(2);CEPEL(3);**

RESUMO

Esta revisão da literatura trata de uma tecnologia que substitui a caixa de engrenagens mecânica por um sistema eletromagnético, desta forma reduzindo a necessidade de manutenção, aumentando a vida útil, melhorando a disponibilidade e a eficiência do aerogerador. Como resultado, ocorre aumento da eficiência e do Fator de Capacidade, melhorando o retorno do investimento e a competitividade do empreendimento. Será apresentado como a tecnologia também pode contribuir na solução do problema de estabilidade eletromecânica das redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, por transferir a estas a inércia mecânica do rotor aerodinâmico do aerogerador.

PALAVRAS-CHAVE: Aerogerador, M-CVT, Estabilidade de Rede, PDD, Vernier.

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescimento da geração de energias renováveis é uma estratégia eficaz 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. No Brasil, os leilões de energia eólica têm alcançado preços surpreendentemente baixos, que é mais um indício da atratividade da modalidade, e indicador da perspectiva de sua expansão. Este crescimento traz consigo problemas específicos ainda não resolvidos, e neste trabalho trata-se daqueles relativos à estabilidade da rede (1, 2, 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, horas, dias), enquanto que os intervalos de tempo dos fenômenos relevantes para a estabilidade da tensão e 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), em relação à 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).

Uma forma de apresentação do problema acima apresentado 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 (5), que tem rotação fixa e gerador de indução acoplado diretamente a uma rede forte. Neste caso, a rede impõe a rotação (RPM) do gerador, em função do número de polos e da

frequência da rede. Com o progresso da eletrônica de potência, a utilização de aerogerador com rotação variável tornou-se viável (6), aumentando significativamente sua eficiência aerodinâmica.

Este informe técnico apresenta a aplicação de caixa de transmissão magnética, com relação de transmissão continuamente variável (M-CVT, *Magnetic Continuous Variable Transmission*), em aerogerador. Neste caso, o gerador elétrico gira em rotação constante, enquanto o eixo primário tem rotação variável, comandada pelo algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking), que além de operar na otimização aerodinâmica, também atua sobre a relação de transmissão do M-CVT. Desta forma, o sistema permite aplicação de um gerador síncrono diretamente conectado à rede elétrica, sem a necessidade do sistema de conversão (Link DC).

2.0 - PROBLEMA DE GERAÇÃO EÓLICA EM REDES FRACAS

A estabilidade é uma propriedade do Sistema Elétrico de Potência (SEP), para um dado ponto de operação, que assegura o retorno a um estado de equilíbrio aceitável após determinadas perturbação. A estabilidade das redes de transmissão é degradada pela presença de um número considerável de usinas eólicas gerando em uma região onde a rede é considerada fraca (2), ou seja, com reduzida potência de curto circuito. Particularmente a estabilidade eletromecânica está relacionada à capacidade do sistema em manter o sincronismo de seus geradores. Esta capacidade está associada ao balanço de potência ativa, no qual a inércia mecânica dos geradores convencionais (Hidroelétricas, Térmicas e Termo-Nucleares) exerce papel fundamental. A estabilidade de tensão, por outro lado, está associada a capacidade do SEP de suportar acréscimos de carga sem entrar em colapso de tensão, que está relacionado ao balanço de potência reativa. Já a estabilidade de frequência se refere à capacidade do SEP de manter a frequência frente a grandes variações de carga ou geração.

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 (2, 7). Os curtos-circuitos nas redes de transmissão são eventos relativamente frequentes, e muitas vezes são causados pelos próprios aerogeradores (8), portanto a preocupação em manter a rede estável é uma realidade cotidiana. O Operador Nacional do Sistema (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 SIN, representa um grande desafio para o ONS (9). Portanto é imperativo que os parques eólicos colaborem em manter a estabilidade e tensão das redes nestas regiões, que tem redes fracas, caracterizadas por apresentar a geração no final de longas linhas radiais. Segundo (9), quando a penetração deste tipo de geração na região é menor do que 20%, este problema não chega a ser grave. Observem os seguintes fatos:

- Yan e Saha (10) relatam evento ocorrido em 28/10/2016 na Austrália, quando a rede tinha 50% de penetração de renováveis e uma oscilação relativamente modesta na rede resultou em um apagão.
- Um projeto da Scottish Power Transmission Ltd (11) enfatiza o risco advindo da fragilidade proveniente do aumento da penetração da energia eólica na região, e citam como consequências eventos de desconexão de geração, necessidade de isolamento de blocos de rede, blackouts ou graves danos em equipamentos. Colocam também que os parques eólicos em nada contribuem com a estabilidade da rede, e que as características dinâmicas da rede tem se transformado pela aplicação de eletrônica de potência de resposta rápida, sem a inércia da geração convencional.
- A WEG forneceu em 2013 dois Compensadores Síncronos Rotativos de 100 MVAR, pesando 310 ton cada, que foram instalados na Subestação Marmeleiro, em Santa Vitória do Palmar (RS), para estabilizar a rede que recebe energia de fontes eólicas¹.

A inércia associada a geração tradicional (hidráulica e térmica) contribui de forma destacada para estabilidade eletromecânica, auxiliando no equilíbrio de potência ativa. Os geradores eólicos controlados por equipamentos de eletrônica de potência, por sua vez, apresentam um sistema de controle bastante rápido que tem como principal objetivo o controle da potência ativa fornecida à rede e não a participação no balanço de potência ativa desta rede. Em determinadas regiões de rede fraca e alta penetração eólica pode ser necessária a adoção de equipamentos que contribuam para o aumento da inércia com o objetivo de aprimorar a estabilidade eletromecânica. Este é o caso do Compensador Síncrono Rotativo de Marmeleiro acima citado, conectado na rede de 525 kV do Rio Grande do Sul.

¹ WEG Revista 72

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS GERADORES ELÉTRICOS MAIS FREQUENTES NOS AEROGERADORES

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 Generator*), no qual parte da energia passa por conversão CA-CC-CA e parte é alimentada diretamente para a rede elétrica.

A principal 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 que tem alto custo(12). Entretanto existe uma grande preocupação quanto a sua capacidade de atendimento aos requisitos de qualidade de energia no caso de falha da rede (13). 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.

A solução DFIG usa eletrônica de potência para adequação ao padrão de tensão e frequência da rede. Entretanto esta solução apresenta eficiência elétrica limitada, e pode introduzir distorções harmônicas na rede (14), além de reduzir a inércia global do sistema. Segundo especialistas do ONS (8), 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).

3. TRANSMISSÃO VARIÁVEL NA GERAÇÃO EÓLICA

Sistemas de transmissão mecânicos continuamente variáveis, popularmente conhecidos por CVT, usam transmissão por atrito, através de correias metálicas sobre polias cônicas, ou esferas entre discos. 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 (15).

Desde o final da década de 80 (16) 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.*², fabricante de CVT, “A aplicação de um CVT em aerogerador tem sido a longo tempo o sonho dos projetistas”.

Verdonschot (14) compara o gerador de indução com o gerador síncrono, fazendo uso de um CVT para a geração eólica. Nejadkhaki *et al.* (15) concluem que 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. Ribeiro (18) estudou a 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. Segundo Mangialardi e Manriota (16) a aplicação do CVT em geradores eólicos é motivada pelo aumento da flexibilidade na variação da rotação do rotor da turbina. Já segundo o NREL (19) os ganhos globais de energia com rotação variável do rotor podem atingir 20%. O uso do CVT possibilita aplicação de geradores de alta confiabilidade como os síncronos de imã permanente e os assíncronos de indução com rotor em gaiola, que resulta em benefícios como a redução dos custos de manutenção e custo da eletrônica de potência (20).

Os sistemas eletrônicos de controle do CVT são específicos para cada aplicação, e tem se desenvolvido principalmente para os veículos elétricos (21). Um trabalho apresenta aplicação de CVT em helicópteros (22), mas considera que a tecnologia com base em atrito, como as apresentadas até esta seção, 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, não existem aerogeradores comerciais que fazem uso de CVT mecânico.

² <http://www.gcinet.nl/en/news/4-gci-starts-development-on-wind-turbine-cvt>

3.0 - TRANSMISSÕES MAGNÉTICAS

A caixa de transmissão mecânica dos aerogeradores, também chamada de caixa de engrenagens, e segundo o *Global Wind Energy Council* (23) é responsável por 20% das falhas e 55% da indisponibilidade dos aerogeradores. Acoplamentos e transmissões magnéticas são dispositivos que se caracterizam por não haver contato mecânico entre os eixos de entrada e de saída. Os eixos são conectados a rotores contendo ímãs montados em geometria circular em torno do eixo de rotação, com polos magnéticos orientados ao longo do eixo, possibilitando a transmissão de movimentos mecânicos rotativos sem que haja contato físico. Por conseguinte, não causam desgaste dos seus componentes, e a transmissão do torque é realizada exclusivamente através da interação de fluxos magnéticos. A aplicação de sistemas de transmissão magnética traz vantagens de eliminar perdas por atrito, problemas de vibração, ruído e aquecimento, além de não precisar de óleo e demandar pouquíssima manutenção.

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 (24), impulsionadas para aplicações de alta potência pelo grande desenvolvimento de ímãs permanentes de alta densidade de energia. Este desenvolvimento permitiu uma característica importante do acoplamento magnético atual, a possibilidade de suportar um alto torque. Segundo estes autores, a densidade de torque que um MG concêntrico suporta vai de 70 a 150 kNm/m³.

Os autores (25) constataram que a taxa de transmissão magnética apresenta baixa eficiência quando se demanda alto torque e alta relação de transmissão, como é o caso da aplicação em energia eólica. Demonstraram que a forma mais eficaz para se obter uma relação de transmissão de 63:1 é usar duas caixas de transmissão magnéticas em série, sendo uma de 9:1 e outra de 7:1.

3.1 TRANSMISSÕES MAGNÉTICAS CONTINUAMENTE VARIÁVEIS (M-CVT)

Segundo Tlali *et al.* (24), nos finais dos anos 60 surgiu o conceito de introduzir mais uma camada concêntrica que serviria como elemento modulador do fluxo magnético, desta forma, possibilitando o desenvolvimento das caixas de transmissão magnéticas continuamente variáveis (M-CVT, *Magnetic Continuous Variable Transmission*).

A partir do início deste século se intensificam as publicações sobre as M-CVT, destacando-se o trabalho desenvolvido na Universidade de Sheffield (26), que inclui nos estudos aplicação na geração de energia eólica. Este trabalho resultou em produtos de mercado atualmente aperfeiçoados e disponibilizados pela empresa *Magnomatics*³ com sede na mesma cidade. Em trabalhos subsequentes da mesma equipe (27, 28), é apresentada a configuração da M-CVT na nacelle do aerogerador, com geração síncrona e sem necessidade de inversores e compensadores de alta potência.

O princípio básico das tecnologias de engrenagens magnéticas variáveis consiste na rotação de três campos magnéticos girantes concêntricos. As rotações ω_1 , ω_2 e ω_3 dos três rotores são relacionadas pela equação 1, que depende do número de polos de cada rotor (n_1 , n_2 e n_3), conforme abaixo (29)

$$n_1 \omega_1 + n_2 \omega_2 = n_3 \omega_3 \quad (1)$$

Desta forma, uma vez imposta uma destas rotações, define-se matematicamente a relação entre as outras duas rotações. Logo, sendo estabelecido o controle de sobre a rotação de um destes campos, está definido o controle da relação de transmissão entre os dois outros. Existem muitas configurações possíveis aplicando o princípio acima, para efeitos didáticos optou-se por apresentar a proposta em (27), onde há um estator com bobinas através das quais é possível estabelecer a rotação desejada para o rotor de controle, e assim estabelecer a relação de transmissão entre o rotor de barras e o rotor interno.

A maioria dos exemplos apresentados para aplicação em aerogeradores mostra o eixo das pás, que tem baixa rotação, ligado ao rotor de barras, e o rotor interno, sendo o eixo de alta rotação e com menor número de polos, acoplado ao gerador de energia. Uma das vantagens da tecnologia, segundo muitos autores (26 – 33), é a proteção de sobrepotência, pois quando o acoplamento magnético é submetido a um torque acima do limite, ocorre o desacoplamento magnético. Esta situação pode ser exemplificada pelo resultado de uma rajada de vento extremamente forte atingindo o aerogerador. Havendo neste momento o desacoplamento, o sistema

3 <http://www.magnomatics.com/>

elétrico não sofrerá impacto importante, e a rotação do rotor aerodinâmico será controlada por freios de segurança e controle do ângulo de passo das pás.

Deve-se destacar os trabalhos aplicando a M-CVT na geração eólica também 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 (30 - 33). Os autores apresentam simulações com resultados, para algumas configurações, como a apresentada na figura 1.

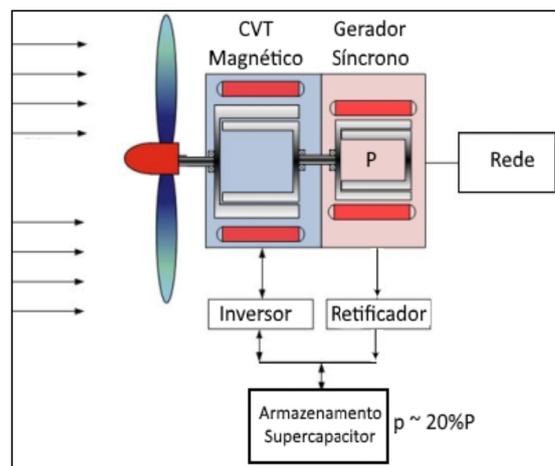


Figura 1 – Aerogerador com M-CVT e gerador síncrono (33).

O sistema de controle do aerogerador apresentado na figura 4, com objetivo de otimização da potência gerada em função das características do aerogerador e do vento, 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 característica do aerogerador, 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. A alta estabilidade deste sistema é possível devido à transferência da inércia do sistema mecânico girante para a rede elétrica, e devido ao sistema de armazenamento de energia, que permite que o M-CVT absorva ou injete rapidamente energia, conforme necessidade detectada pelo sistema de controle. A potência do sistema de armazenamento recomendada pelos autores é de 20% da potência nominal do aerogerador. Os autores 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. Outras técnicas de controle do desempenho aerodinâmico podem apresentar sinergia no sistema de controle integrado, destacando-se a tecnologia de atuadores de plasma na superfície das pás (33, 34).

3.2 MAQUINAS ELÉTRICAS COM MODULAÇÃO DE FLUXO MAGNÉTICO

Paralelamente ao desenvolvimento das transmissões M-CVT, o mesmo princípio dos três campos giratórios concêntricos tem sido desenvolvido para máquinas elétricas (motores e geradores). Uma das aplicações de interesse na indústria eólica são os PDD (*Pseudo Direct Drive*) (35). Neste tipo de aplicação para aerogerador a caixa de engrenagens deixa de existir, e o eixo do rotor das pás é ligado diretamente no eixo de baixa do PDD, e o eixo de alta rotação é um gerador síncrono de ímãs permanente, mas não gira em rotação síncrona com a rede, ou seja, precisa de um link DC para conectar-se à rede. Neves *et al.* (29) apresentam uma metodologia de dimensionamento de gerador PDD para aplicação eólica, assim como comparam custos com sistemas de acoplamento direto e com caixas de engrenagens; e concluem que o PDD tem um custo muito inferior.

Mais uma configuração que se apresenta é a aplicação de máquinas elétricas que usam o princípio Vernier de modulação de fluxo magnético. Esta tecnologia vem se desenvolvendo desde os anos 90, e tem vantagem de integrar a máquina geradora e o acoplamento continuamente variável em um só equipamento, além de permitir maior densidade de torque (35), podendo chegar até acima de 130 kNm/m³. As primeiras configurações de máquinas elétricas integradas com este tipo de transmissão surgiram na primeira década deste século (25). Zaini

et al. propõe uma configuração de gerador Vernier – M-CVT (36), apresentada na figura 2, que aparentemente tem vantagens não só em custo e tamanho do equipamento, como também tem melhor controle de harmônicos, segundo os autores.

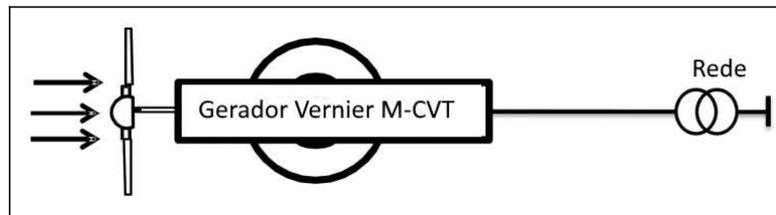


Figura 2 – Integração gerador-transmissão proposta para sistema eólico [36].

Uma máquina de ímãs permanentes *Vernier Pseudo Direct Drive* (VPDD) (37) apresentada na figura 3 apresenta rotor interno de alta rotação com pequeno número de polos e o externo, com muitos polos, é o rotor de baixa rotação. Uma VPDD pode ser considerada como uma combinação de uma máquina vernier de ímã permanente com uma máquina de ímã permanente; assim como, segundo os autores, pode ser também considerada como combinação entre um gerador síncrono de ímã permanente com uma máquina engrenagem magnética.

Com a geometria otimizada apresentada, os autores demonstram resultados de densidade de torque de 130 kNm/m³ e Fator de Potência de 0,94.

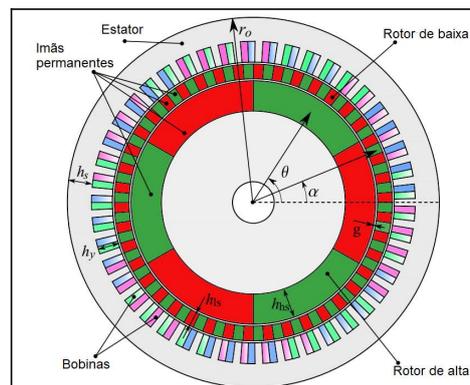


Figura 3 - Máquina *Vernier Pseudo Direct Drive* (VPDD) (37)

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. Existe uma diversidade relativamente grande de topologias de máquinas elétricas com base no conceito das engrenagens magnéticas (36 - 38). Wang e Gerber (38) apresentam, a integração de um gerador de ímã permanente (PMG) com uma engrenagem magnética (MG) com estator interno. Esta configuração MGPMG (Engrenagem magnética com gerador de ímãs permanentes) apresenta vantagens em relação as demais opções analisadas (DFIG, PMG harmônica, PMG síncrona e PMG com estator externo), cuja configuração está na figura 4.

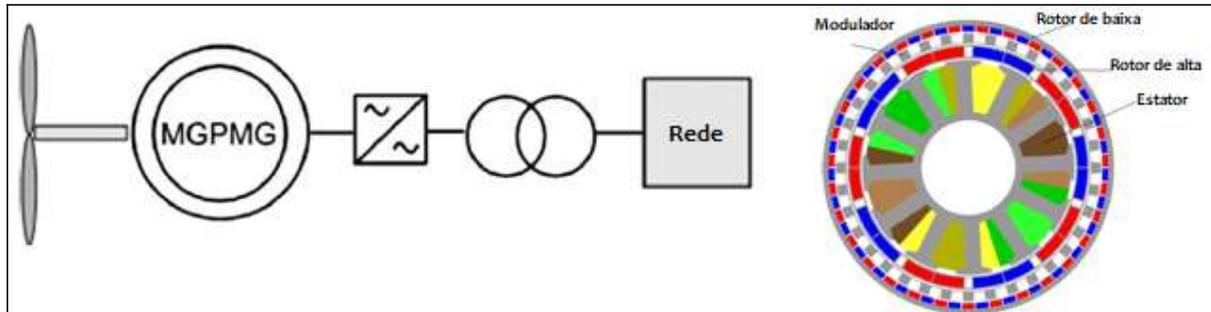


Figura 4 – Configuração do sistema (esq.) e dos rotores (dir.) do sistema de geração MGPMG (38)

Tlali *et al.* (39) apresenta de otimização de uma máquina MGPM (*Magnetically Geared Permanent Magnet*) proposta para aplicação em geração eólica, com estator externo, apresentada na figura 5. O processo contou com resultados obtidos com protótipo de bancada, comparados aos resultados da modelagem. Para esta configuração, os autores concluem que existe uma relação inversamente proporcional entre a massa total da máquina e a massa de ímãs permanentes, que é parte relevante nas decisões do projeto. Vale ressaltar que as máquinas apresentadas nesta seção 3.2 não transferem a inércia mecânica para a rede elétrica, como o M-CVT apresentado na seção 3.1, porque precisam corrigir a frequência para a da rede elétrica.

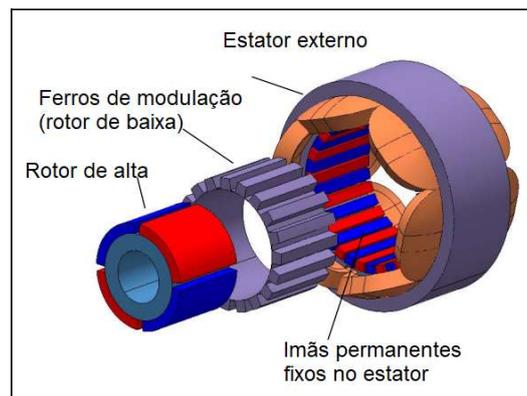


Figura 5 – Estrutura de uma máquina MGPM proposta para aplicação em geração eólica, com estator externo (39).

A variedade de topologias, configurações e sistemas que a tecnologia de engrenamento magnético de rotores permite, tornou a matéria um dos tópicos mais frequentes nas publicações sobre máquinas elétricas nos últimos anos (40), sendo que a figura 6 apresenta algumas das alternativas analisadas pelos autores.

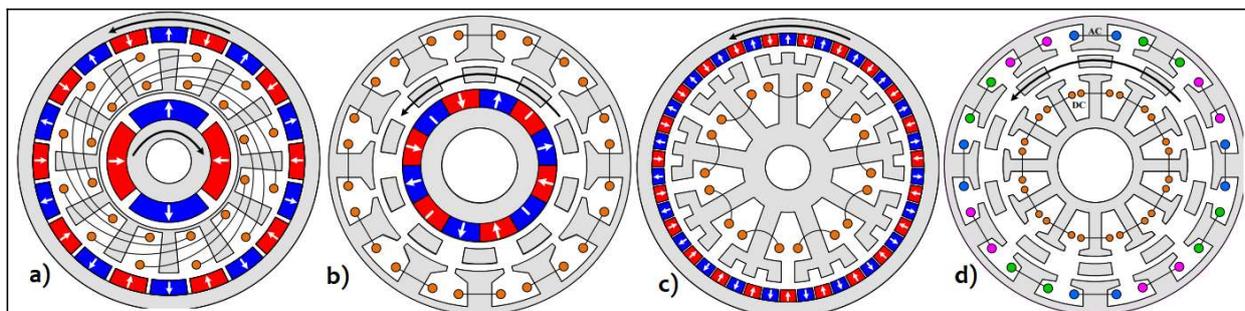


Figura 6- (a) Pseudo-Maquina com estator intermediário (b) PS-FRPM (*Partitioned Stator - Flux Reversal Permanent Magnet*); (c) Máquina Vernier com uma fresta de ar ; (d) PS-VFRM (*Partitioned Stator - Variable*)

Flux Reluctance Machine) (40).

3.3 PROTÓTIPOS

Muitos dos exemplos da literatura apresentam resultados de protótipos em ensaios em bancada, comparado a modelagem numérica. Como a tecnologia encontra-se em fase inicial de desenvolvimento, naturalmente há poucos exemplos de protótipos em escala piloto. Citamos dois casos de desenvolvimento envolvendo protótipos para aplicação eólica em andamento. Um destes é o programa europeu DemoWind (<http://www.demowind.eu>), voltado para financiamento de inovações voltadas para energia eólica offshore, realizou aporte de 1,5 milhões € para o projeto CHEG (Compact High Efficiency Generator - <https://cheg.eu>) que consiste em produzir e testar um aerogerador de 500 kW. Este projeto encontra-se em andamento, sob coordenação da Magnomatics (UK) tendo como parceiros a GL Garrard Hassan (NL) e a EDF R&D (UK), dentre outros.

O projeto INNWIND (41), coordenado pela DTU Wind Energy, trabalha com orçamento de 20€ milhões no desenvolvimento de aerogeradores da classe 10 a 20 MW, para aplicação offshore. A tecnologia PDD da Magnomatics concorre com a de gerador supercondutor nesta aplicação. A Figura 7 mostra foto e resultados com protótipo de bancada.



Figura 7 – Ensaio com PDD de 5 kNm (esquerda) e de 16 kNm (direita) do projeto INNWIND (41).

O relatório de 2017 do projeto INNWIND (41) cita que além dos PDD mostrados na figura 8, um protótipo de aerogerador usando PDD com torque de 200 kNm estava em fabricação para testes. O relatório avalia comparativamente ainda a tecnologia de gerador supercondutor com o PDD, e conclui que o acoplamento magnético (PDD) é mais competitivo em termos de preço e desempenho do que o gerador supercondutor, mas é vulnerável ao preço dos ímãs.

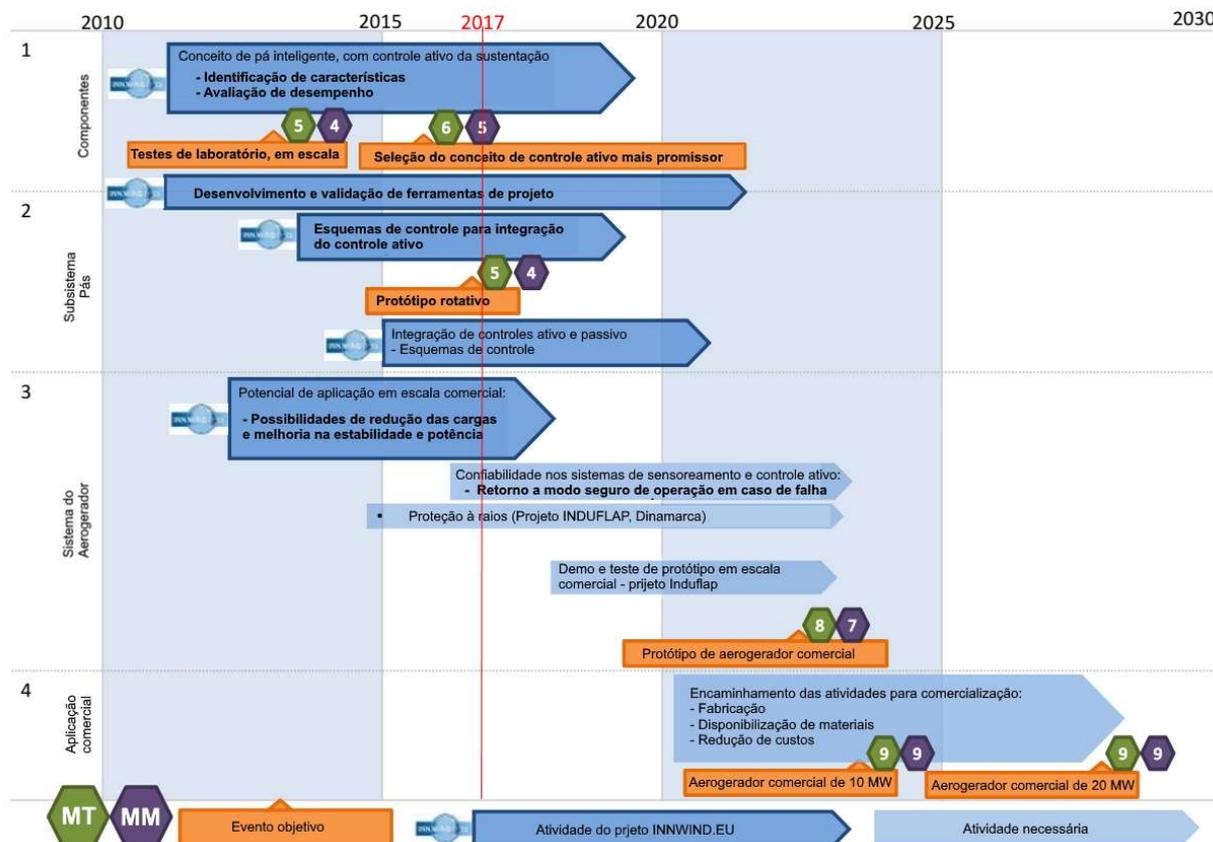


Figura 8 Panorama de evolução da tecnologia PDD, segundo relatório do projeto INNWIND de 2017 (41), considerando os níveis de Maturidade da Tecnologia (MT) e da Manufatura (MM).

4.0 - CONCLUSÕES

Considerando a experiência na operação e despacho de energia da região NE na ONS, Cisneros *et al.* (42) recomendam como medidas para melhorar o desempenho da Geração Eólica que os aerogeradores participem ativamente do controle de frequência e colaborem para resistir a impactos da rede elétrica. Em outras palavras, Bassini *et al.* (2) coloca que os parques eólicos devem oferecer uma referência estável para a rede, ao invés de depender da sua estabilidade.

Um relatório apresentado pelo NREL (43) indica que o uso de reserva inercial mecânica rotativa pode ser uma boa solução para o problema de estabilidade de rede com alta penetração de energias renováveis. Sem a inércia, um sistema demora mais para se recuperar de um evento de rede, 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 voltagem e/ou a frequência do sistema (44).

Os sistemas de geração com M-CVT, ou aquelas com o gerador embutido (PDD ou máquina Vernier), são uma classe de equipamentos que abre um grande leque de oportunidades na geração eólica. A tecnologia envolvida tem princípios bem conhecidos, mas as possibilidades de arranjos e geometrias definem uma área de conhecimento ainda nova para a energia Eólica, por este motivo é possível que a configuração ideal, ou aquela que virá a ser aplicada, ainda não esteja claramente definida. A vantagem de aplicação de dois estágios de engrenamento sugerida por Park *et al.* (25), leva à avaliação da possibilidade da combinação de M-CVT com VPDD. Além disso, dentre as vantagens da tecnologia M-CVT citadas pelos diversos autores, só a equipe do Prof. Sergey Udalov (Universidade de Novosibirsk, 30-33) enfatiza o ganho de da estabilidade pela transferência da inércia mecânica para a rede elétrica. Uma vez que o mercado considere que esta seja uma característica de projeto importante, deverá ser incluída no processo de avaliação e seleção da configuração dos sistemas.

Eventualmente uma lacuna regulatória possa ser preenchida de forma a incentivar a adoção de tecnologias inovadoras que tragam soluções efetivas, como a que se apresenta.

Finalizando, a grande vantagem de ter um sistema de controle da geração que não depende basicamente dos parâmetros da rede para estabelecimento da sua operação, e sem a necessidade de um link de corrente contínua, vem a abrir interessantes possibilidades para solução do problema associado ao aumento da penetração da energia eólica na matriz energética nacional. A sinergia desta característica com a substituição da caixa de engrenagens mecânica por um sistema magnético sem contato potencializa expressivamente as possibilidades de ganhos e acelera o desenvolvimento da tecnologia. Os produtos disponibilizados e em desenvolvimento (41) apontam a existência de uma forte aposta em que os futuros aerogeradores de alta potência dispensem as transmissões mecânicas e integrem transmissão magnética e geração de energia em um só componente.

Entretanto a tecnologia ainda não está pronta para o mercado, e como se observa na figura 8, provavelmente só esteja em 2025. Futuros trabalhos devem reforçar o amadurecimento da tecnologia, através de modelagem, ensaios de bancada e em aerogeradores em escala piloto, e em escala industrial, de forma que esteja disponível para aumento da eficiência e redução do custo nivelado da energia para parques eólicos terrestres e offshore, especialmente para a família de aerogeradores acima de 10 MW. Os impactos da inserção destas tecnologias nos sistemas de potência em termos de estabilidade devem ser aprofundados na medida que podem exigir soluções de engenharia adicionais e o custo desta solução inserido no projeto ou mesmo indicar que algumas tecnologias sejam inapropriadas.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (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.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 2016) Xi'an, 10-13 Aug, 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) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., e Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, 2001
- (6) Hau, E. Wind Turbines Springer-Verlag, Berlin, 2006
- (7) 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
- (8) 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 , 2015
- (9) Cisneiros, S.J.N., Botelho, M.J., Brasil, D.O.C., Medeiros, F.C., Groetaers, M., Fernandes, A.B., Medeiros, A.D.R., Sardinha, S.L.A., e Bianco, A. (ONS) New challenges caused by the new energy sources in the Brazilian power system Paper CIGRE SC_C4_PS1_104 2014
- (10) Yan, R.G.U., e Saha, T. K., Minimum Synchronous Inertia Requirement of Renewable Power Systems IEEE Transactions on Power Systems, V. 33, 2, 2018
- (11) SPT, 2014 Project name: "Visualisation of Real Time System Dynamics using Enhanced Monitoring (VISOR)" Application for Scottish Power Transmission Ltd (SPT) Funding, available at: https://www.spenergynetworks.co.uk/userfiles/file/20140430_VISOR_Project_submission_document.pdf
- (12) Alsmadi, Y. M., Xu, L., Blaabjerg, F., Ortega, A. P., Abdelaziz, A., Y., Wang, A., and Albataineh, Z., Detailed Investigation and Performance Improvement of the Dynamic Behavior of Grid-Connected DFIG Wind Turbines under LVRT Conditions IEEE Transactions on Industry Applications Mai. 2018
- (13) 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
- (14) 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

- (15) Nejadkhaki, H. K, Chaudhari, S., e Hall, J. F., A design methodology for selecting ratios for a variable ratio gearbox *Renewable Energy*, 118 ; 2018
- (16) Mangialardi, L.e Mantriota, G., The advantages of using continuously variable transmissions in wind power systems *Renewable Energy* V 2, Issue 3, June 1992
- (17) Yin, X., An up to date review of continuously variable speed wind turbines with mechatronic variable transmissions *Intl. J. Energy Research*, Dec 2017
- (18) Ribeiro, Felipe Estudo da aplicação de transmissão continuamente variável (CVT) em geradores eólicos de médio porte *Diss. M.Sc., UFABC*, 2010
- (19) Fingersch, L.J., Robinson, M.C., The Effects of Variable Speed and Drive Train Component Efficiencies on Wind Turbine Energy Capture NREL/CP-500-22082 2001, ASME/AIA Wind Energy Symposium, 1997
- (20) Cotrel, J., Assessing the Potential of a Mechanical Continuously Variable Transmission *NREL/TP-36371* 2004
- (21) 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
- (22) Hameer, S., A Comparative Study and Application of Continuously Variable Transmission to a Single Main Rotor Heavy Lift Helicopter *PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, USA*, 2009
- (23) GWEC Global Wind Statistics 2017 (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL), Fev 2018
- (24) Tlali, P. M., Wang, R-J., e Gerber, S., Magnetic Gear Technologies: A Review *IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, nov. 2014
- (25) Park, E-J., Kim, Y-J., Kim, C-S, e Jung, S-Y., Dual Magnetic Gear for Improved Power Density in High-Gear-Ratio Applications 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Korea, 2018.
- (26) Atallah, K, e Howe, D., A Novel High-Performance Magnetic Gear *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001
- (27) Wang, J., Atallah, K., e Carvley, S. D., A Magnetic Continuously Variable Transmission Device *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, oct. 2011
- (28) 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
- (29) Neves, C. G. C., Flores Filho, A. F., e Dorrell, D. G Design of a Pseudo Direct Drive for Wind Power Applications *International Conference of Asian Union of Magnetics Society (IEEE)*, 2017
- (30) Udalov, S., Achitaev, A. A., e Pristup, A. G., Improving Dynamic Stability of a of Wind Turbine Using Magnetic Continuously VariableTransmission *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, *IEEE*, Omsk, 15-17 Nov. 2016.
- (31) Udalov, S., Achitaev, A., Pristup, A. G., A., Bochenkov, B. M., Pankratz, Y., Using a Magnetic Continuously VariableTransmission for Synchronization of Wind Turbine Generators Under a Variable Wind Speed *XI IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines* Omsk, 14-16 Nov. 2017.
- (32) Udalov, S., Pristup, A. G., Achitaev, A. A., Bochenkov, B. M., e Pankratz, Y. E Tarbill, R.D., Increasing the regulating ability of a wind turbine in a local power system using magnetic continuous variable transmission *Wind Engineering* · June 2018
- (33) Udalov, S., Achitaev, A., e Marchenko, V.A., Frequency Responses of Wind Turbines with Magnetic Speed Reduction in Autonomous Power Systems *XII IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines* Omsk, 2018.
- (34) Pechlivanoglou G Passive and active flow control solutions for wind turbine blades. PhD Thesis, Universitätsbibliothek der Technischen Universität Berlin, 2012
- (35) Yin, X., Fang, Y., Huang, X. e Pfister, P., Analytical Modeling of a Novel Vernier Pseudo-Direct-Drive Permanent-Magnet Machine *IEEE Transactions on Magnetics*, V 53, N. 6, 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.
- (37) Wang, Q., Qin, W., e Pfister, P-D., A Vernier Pseudo-Direct-Drive Permanent-Magnet Machine *IEEE XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM) 2018*
- (38) Wang, R-J., Gerber, S., Magnetically geared wind generator technologies: Opportunities and challenges *Applied Energy* 136 (2014)
- (39) Tlali, P. M., Gerber, S., e Wang, R-J., Optimal Design of an Outer-Stator Magnetically Geared Permanent Magnet Machine *IEEE Transaction on Magnetics*, V52.. N.2, 2016
- (40) Zhu, Z. Q., Deodhar, H. Y., R. Li, Pride, A. e Sasaki, T. Recent Developments and Comparative Study of Magnetically Geared Machines *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, V. 2, N. 1, 2018

- (41) Dobbin, J., Mast, E., e Echavarria, E. - Technology Roadmap with path from innovative project results towards implementation in the market Doc. N. D5.13/A, projeto INNWIND 2017 "LCOE reduction for the next generation offshore wind turbines" (www.innwind.eu)
- (42) Cisneros, S., 2017 Integração da geração eólica e solar e de recursos de 'storage' no Sistema Elétrico Brasileiro 2ª Reunião Extraordinária do Comitê Técnico do Cigré-Brasil, Rio de Janeiro, Agosto de 2017
- (43) USDOE The Voice of Experience- Integrating Intermittent Resources NREL, 2017
- (44) Califórnia ISO 2016 Califórnia Independent System Operator Corporation - Frequency Response Phase 2 - Issue Paper December 15, 2016

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



ANTONIO CARLOS DE BARROS NEIVA

Graduado em Engenharia Mecânica, na modalidade Potência e Gás, em 1981 na UNICAMP, tendo também Mestrado na mesma instituição em 1996; e MBA em Gestão de Projetos com ênfase em Planejamento na Fundação Getúlio Vargas em 2008. Atuou em indústrias como Engenheiro de Processos, Chefe de Produção e Gerente de Engenharia, assim como foi empresário, e coordenou projeto de pesquisa inovadora em pequena empresa PIPE - FAPESP. Atualmente é Pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobras, 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.



GEORGE ALVES SOARES

Mestrado pela Pontifícia Universidade Católica em 1988 e o doutorado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1998. Trabalha na área de Eficiência Energética nos últimos 30 anos. Atuou em vários cargos na Eletrobras, implantando programas nacionais como PROCEL Indústria, Edifica, Prédios Públicos, Gestão Energética Municipal e Reluz. Foi responsável também pelas Áreas corporativa e de novos negócios em eficiência Energética da Eletrobras. Atualmente ele é Assessor do Diretor Geral do Cepel. Ele é membro do Comitê Executivo da Rede Latino americana e do Caribe de Eficiência Energética, Coordenador do Comitê Técnico responsável estabelecimento de rendimentos mínimos em motores, Coordenador dos GT-Edificações e do GT-Motores reconicionados do CGIEE/MME; Fpo Coordenador Geral de Eficiência Energética do MME. Tem publicado diversos artigos e proferido palestras divulgando a Eficiência

Energética e a ISO 50.001.