



A CONEXÃO DE CENTRAIS DE GERAÇÃO EÓLICA AO SISTEMA ELÉTRICO: EXPERIÊNCIAS E DESAFIOS TÉCNICOS ATUAIS E FUTUROS

**Álvaro J. P. Ramos¹, Rodrigo Bezerra Valença¹, José Sandro Valença do Nascimento
Filho¹
1 ANDESA**

Av. Eng. Domingos Ferreira, 2215, SL 605, Boa Viagem, Recife, CEP. 51020-031, Brasil

alvaro@andesa.com.br, alvaro@andesa.com.br e arffreire@gmail.com

1. APRESENTAÇÃO

A geração eólica no Brasil iniciou-se com o PROINFA nos anos 2004 a 2006. Os primeiros estudos de conexão de parques eólicos se baseavam em experiências internacionais principalmente na Europa que certamente inspiraram a primeira versão dos Procedimentos de Rede (Submódulo 3.6, versão 03, aprovada pelo ONS em Março 2004) que incluía a conexão de geração eólica. A partir das primeiras centrais de geração eólica – CGE no âmbito do PROINFA, a maioria de pequeno/médio porte (em 13,8 e 69kV) e conectadas na distribuição/subtransmissão até os atuais complexos eólicos de grande porte conectados na rede básica (230 e 500kV) acumulou-se vasta experiência da conexão e operação de geração eólica no sistema brasileiro.

Este trabalho procura compilar algumas experiências vivenciadas em centenas de estudos de conexão realizados ao longo dos últimos 10 anos de geração eólica no Brasil. O objetivo primordial é trazer para discussão a experiência da aplicação dos requisitos técnicos atuais para a conexão da geração eólica ao sistema e os impactos dos mesmos na operação do sistema até o momento quando já temos em operação mais de 13GW de potência eólica instalada. Na sequência, o trabalho destaca as principais características inerentes a geração eólica, suas consequências e problemas decorrentes. Tal diagnóstico torna-se essencial em função da evolução destas questões a medida em que se eleva o montante e a concentração da geração eólica no sistema brasileiro nos próximos anos.

2. INTRODUÇÃO

Algumas características inerentes e intrínsecas a geração eólica são determinantes quando se analisa seus impactos no sistema elétrico. A imprevisibilidade e variabilidade da geração eólica (fonte de geração não despachável) são características específicas que exige requisitos técnicos também específicos a serem



sejam observados. Embora a geração eólica possa ter sido considerada no passado como uma geração distribuída, no Brasil a tendência é a geração concentrada em grandes blocos. Assim, a geração eólica no Brasil, em grande parte, apresenta os mesmos problemas conhecidos no passado da geração hidroelétrica decorrentes de grandes blocos de geração localizados a grandes distâncias dos centros de carga requerendo robustos sistema de transmissão para escoamento da potência gerada. Esta pode ser uma característica marcante da geração eólica no Brasil que certamente a diferencia da experiência europeia..

Palavras-chave: *Procedimentos de Rede do ONS-PR/ONS; Centrais de Geração Eólica, – CGE; Ponto de Conexão – PAC; Fator de Potência – FP; Sistema Interligado Nacional - SIN ; SEP - Sistema Especial de Proteção*

3. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS E INERENTES DA GERAÇÃO EÓLICA E SUAS CONSEQUÊNCIAS

Devido a variabilidade e imprevisibilidade da velocidade dos ventos a curto prazo para fins de programação diária da operação, a geração eólica envolve um certo nível de incertezas e demanda frequentemente decisões e ações em tempo real para o controle dos intercâmbios entre áreas, o balanço carga/geração e o perfil de tensões do SIN. Por ser uma fonte renovável, a geração eólica é considerada prioritária na maioria dos países com relação a todas outras formas de energia, o que significa dizer que as demais fontes devem ser despachadas a cada momento em função da geração instantânea dos parques eólicos aproveitando-se plenamente a energia eólica disponível a cada momento.

Existem hoje no sistema brasileiro pelo menos dez fabricantes distintos de aerogeradores a grande maioria originário da Europa e do tipo “DFIG – Double Fed Induction Generator”. Na faixa de 30% são do tipo “Full Converter” e algumas poucas unidades instaladas ainda na época do PROINFA são do tipo rotor de gaiola ou com resistência de rotor que já se encontram extintas do mercado. Ao contrário dos geradores síncronos que apresentam respostas semelhantes independente do fabricante, as respostas dos aerogeradores são determinadas pelo controle dos conversores. Assim sendo, verifica-se que as diferentes filosofias de controle utilizada por cada fabricante resulta em desempenhos distintos. Muitas vezes as funções adotadas em cada aerogerador foram implantadas para atendimento de exigências de projetos anteriores em algum lugar do mundo. Antes da revisão 2016.12 que vigorou a partir de Janeiro 2017, os PR/ONS não faziam nenhuma exigência com relação ao comportamento dinâmico dos aerogeradores durante os defeitos, mas apenas estabelecia condições mínimas para as quais os aerogeradores não podiam ser desligados (característica LVRT-“Low Voltage Ride Through”).



4. ESTUDOS E GESTÃO DA CONEXÃO

4.1. ASPECTOS GERAIS

As atividades de projeto das instalações, estudos, construção/montagens e comissionamento, entre outras, envolvem um relacionamento intenso entre fabricantes, projetistas, equipe de estudos, ONS e empresas de transmissão/distribuição que perdura até a entrada em operação comercial da planta.

Os estudos para conexão de parques eólicos são de responsabilidade do agente de geração e são exigidos pelo ONS para obtenção do que seria um “diploma de agente de geração”, denominado de “Parecer de Acesso”. O “Parecer de Acesso” representa pois, um certificado ou diploma que confere ao agente todas as prerrogativas e deveres de agente previstos na legislação.

Como são estudos razoavelmente detalhados é necessário que se tenha, mesmo preliminarmente, os projetos elétricos e a especificação de todos os equipamentos.

Embora o “cliente” e usuário destes estudos seja o ONS, é comum que o escopo destes estudos seja ampliado para atender a outras demandas, tais como especificação dos equipamentos e dimensionamento da instalação tais como, disjuntores, malha de terra, etc.

4.2. TIPOS, OBJETIVOS E RESPONSABILIDADE DOS ESTUDOS DE CONEXÃO

A conexão da geração eólica envolve os seguintes principais estudos elétricos:

a) Estudo de Parecer de Acesso; b) Estudos de Projeto Básico e c) Estudos Pré-operacionais.

Os estudos de Parecer de Acesso envolvem análises de regime permanente, dinâmico e de qualidade de energia. Os produtos ou “outputs” destes estudos são indicações de providências necessárias para atendimento aos requisitos técnicos previstos nos Procedimentos de Rede. Os estudos de projeto básico podem ser exigidos ou não dependendo de cada projeto, sendo também responsabilidade do agente. Para projetos com conexão em 500kV os estudos de projeto básico serão seguramente exigidos pelo ONS. Estes estudos fornecem os elementos necessários à especificação dos equipamentos de subestação. São estudos de transitórios eletromagnéticos que analisam entre outros pontos, religamentos de linha tripolar e monopolar, coordenação de isolamento, TRV, etc. Os estudos pré-operacionais são estudos muito detalhados que fornecem os elementos necessários ao planejamento da operação dos parques eólicos sendo de responsabilidade do ONS. Estes estudos envolvem análises de regime permanente, dinâmico e transitórios eletromagnéticos (TEM). Os estudos de TEM tratam basicamente da energização da linha de conexão do parque ao sistema e transformadores da subestação do parque. Embora sejam de responsabilidade do ONS é muito usual que o ONS autorize que o próprio agente assuma esta tarefa.

5. CONEXÃO DE GERAÇÃO EÓLICA: REQUISITOS DE DESEMPENHO

Os estudos de Parecer de Acesso compreendem as análises de desempenho em regime permanente, dinâmico e qualidade de energia.

5.1. DESEMPENHO EM REGIME PERMANENTE

O denominado regime permanente representa “fotografias” de condições operativas mais críticas onde se verificam os impactos da geração eólica na operação do SIN e o atendimento aos requisitos dos PR. Nos Estudos de regime permanente são verificados os atendimentos as exigências de desempenho conforme os PR/ONS [01] que tratam dos seguintes pontos principais:

5.1.1. Geração/Absorção de Potência Reativa no PAC

Esta exigência se fundamenta na necessidade da participação da geração eólica no controle de tensão do Sistema. Este aspecto é particularmente importante considerando a variabilidade da geração eólica podendo provocar variações de tensão no SIN. Este requisito é ilustrado na Figura 1. Ressalta-se que esta exigência deve ser atendida na faixa de tensão operativa, 90-110% como ilustrado na Figura 2.

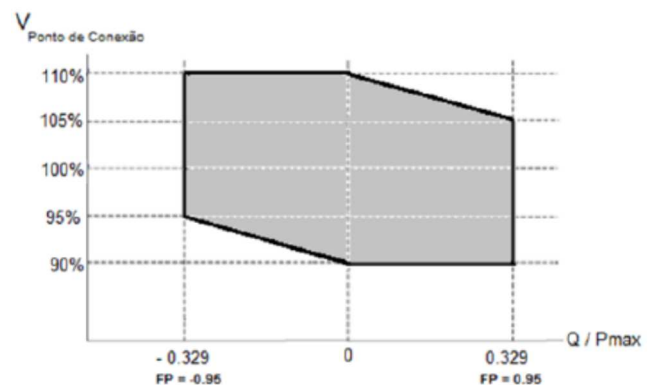
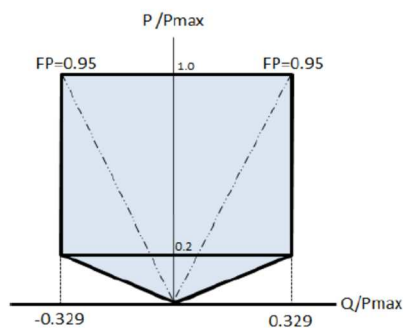


Figura 1 – Curva Capacidade da CGE no PAC [01]

Figura 2 – Requisitos FP no PAC[01]

5.2. DESEMPENHO EM REGIME DINÂMICO – PEQUENAS PERTURBAÇÕES

5.2.1. Modos de Controle

A exigência deste recurso está relacionada ao desempenho das CGE nas pequenas perturbações. Embora se analise o desempenho do sistema em regime permanente, na realidade operacional o sistema se encontra sempre em estado dinâmico contínuo ou submetido a pequenas e normais perturbações. As pequenas perturbações são consideradas variações normais como as variações de tensão resultantes de variação de potência de geração das CGE, variações de carga ou mesmo defeitos remotos. Desta forma, o conceito de “dinâmica de pequenas perturbações” equivale a algo que poderia se designar como “regime permanente operacional” para distinguir do conceito de regime permanente usual que é uma “fotografia estática” de um

ponto de operação. Os PR/ONS requerem que a CGE tenha recursos para os modos de controle de tensão no barramento coletor (MV) ou potência reativa ou fator de potência no ponto de conexão. São recursos de controle automático em geral implementados dentro do denominado “PPC- Plant Plant Control”. Para se assegurar uma coordenação entre os controladores das CGE os PR/ONS recomendam utilizar características de regulação como mostrado na Figura 3. Ressalta-se que o benefício deste recurso é simplesmente automatizar a operação do sistema proporcionando simplicidade e qualidade operacional.

5.2.2. Participação no Controle de Sobrefrequência

Este é um requisito conceitualmente relacionado as pequenas perturbações e associadas ao controle de frequência do sistema. A característica potência x frequência sugerida pelo item 9, pagina 29/38 de [01] é mostrada na Figura 4.

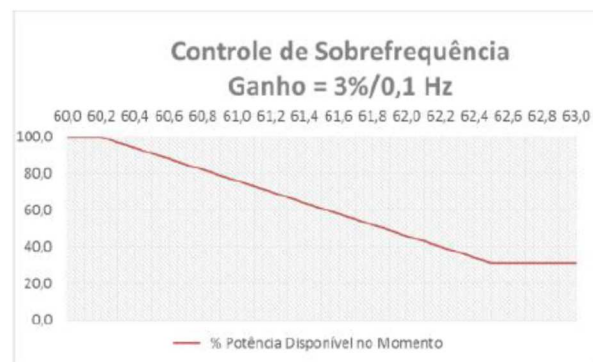
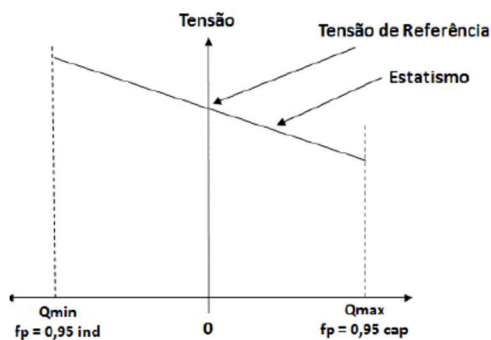


Fig. 3 - Característica/regulação Tensão CGE [01]

Figura 4 - Controle sobrefrequência

5.3. DESEMPENHO EM REGIME DINÂMICO – GRANDES PERTURBAÇÕES

As grandes perturbações estão associadas a ocorrência de defeitos no sistema que resultam em grandes variações de tensão. A resposta das CGE nestes eventos são determinantes no desempenho global do sistema principalmente em áreas de grande concentração de geração eólica. Obviamente, este aspecto tende a ser cada vez mais relevante a medida em que se eleva a concentração de geração eólica numa certa área do sistema. Nas grandes perturbações causadas por defeitos, cabe distinguir três períodos distintos: “durante o defeito”, o período de “restabelecimento” e o “novo regime permanente”. Para cada um destes períodos é essencial se estabelecer alguns condicionantes de modo que se possa garantir uma contribuição efetiva das CGE para o desempenho global do sistema.

5.3.1. Requisitos de Suportabilidade

O primeiro requisito de desempenho nas grandes perturbações é a capacidade de que a CGE não desligue pela atuação de suas proteções por ocasião de variações de frequência e variações de tensão durante um certo período de tempo como ilustrado nas Figuras 3 e 4 respectivamente [01]. A Figura 6 mostra as curvas conhecidas como “Low Voltage Ride Through-LVRT” e “Overvoltage Ride Through-OVRT” que correspondem respectivamente a parte inferior da curva (subtensão) e superior (sobretensão) [01].

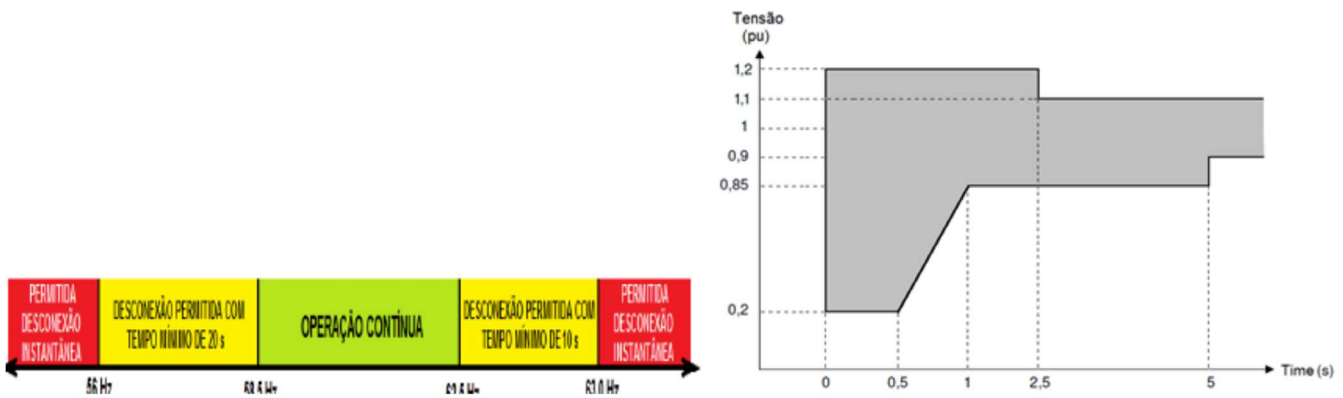


Fig. 5 – Suportabilidade a variações de frequência [01] Fig. 6 – Suportabilidade a variações de tensão [01].

5.3.2. Desempenho Durante Defeito

Quando da ocorrência de defeito, o controle das CGE é comutado temporariamente para o denominado “modo LVRT” que é uma função de controle completamente diferente do modo de controle normal. Este processo é geral para todos os fabricantes, embora cada um tenha uma estratégia própria para isto. Como não é fisicamente possível injetar potência ativa “P” com tensão nula ou muito baixa, a estratégia comum a todos aerogeradores é “zerar” ou reduzir a valores mínimos a injeção de “P” durante o defeito. Com relação a potência reativa “Q” os PR/ONS estabelecem que as CGE devam ter recursos para injetar “Q” conforme mostra a Figura 7 (item 8.8, pagina 31/38 de [01]). A decisão do ONS de se utilizar este recurso em cada caso dependerá de estudos para que sejam assegurados os benefícios esperados para o sistema sem riscos de sobretensões como tratado adiante neste trabalho.

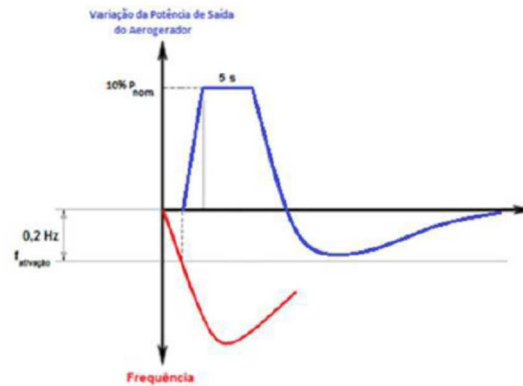
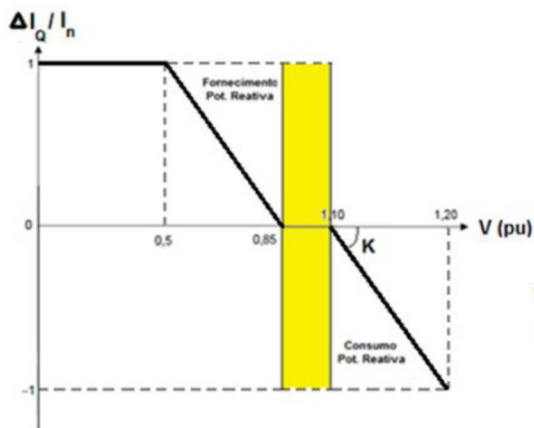


Fig. 7 - Requisito de injeção de “Q” [01]

Figura 8 - Resposta ilustrativa da Inercia sintética [01]

5.3.3. Desempenho Durante Restabelecimento

Dependendo do sistema e da severidade da perturbação, para se assegurar um novo ponto de operação evitando-se o colapso do sistema é necessário se adotar esquemas especiais de proteção “SEP” que desligam geração, carga ou componentes do sistema. Entretanto, em muitos eventos, o desempenho dos controles das CGE são determinantes no restabelecimento de um novo “regime permanente” ou novo ponto de operação do sistema. Com relação a este ponto, os PR/ONS indicam 2 requisitos:

5.3.3.1. Rampa de restabelecimento da Potência ativa (item 7, pagina 27/38 de [01]) – este requisito estabelece que a velocidade de recuperação de “P” possa ser definida para cada caso além de algumas exigências para situações onde ocorre subfrequência. Muitos aerogeradores do mercado já possibilitam o ajuste da “rampa de restabelecimento “P” após o defeito, lembrando que durante o defeito a potência ativa das CGE são reduzidas ou mesmo anuladas.

5.3.3.2. Inercia sintética - este requisito visa estabelecer uma participação das CGE no restabelecimento do sistema no que diz respeito ao controle primário de frequência, os seja, contribuir temporariamente com elevação de geração durante eventos de acentuadas subfrequência decorrentes de déficits momentâneos de geração no sistema. Como se sabe, esta elevação se dará pelo uso temporário da energia cinética das massas girantes dos aerogeradores [02].

6. COLETÂNEA DE EXPERIÊNCIAS

6.1. COMENTÁRIOS GERAIS

Como se sabe, se encontra em operação algo na faixa de 13GW de geração eólica no Brasil onde 10GW se concentram na região Nordeste. São parques eólicos instalados em diversas épocas desde 2008 ao longo da evolução do conhecimento técnico e experiencia no Brasil neste tipo de geração. São também muitos tipos



e fabricantes de aerogeradores que refletem também a evolução tecnológica dos aerogeradores desde aqueles tipos rotores de gaiola até os mais modernos disponíveis no mercado. Os próprios PR/ONS, nas suas várias revisões refletem este processo evolutivo de aprendizado ao longo dos últimos anos. Neste momento, julgamos já existirem experiências da geração eólica, possivelmente dispersas entre agentes de geração, fabricantes, consultores e do próprio ONS que merecem ser compiladas e discutidas para compor o acervo tecnológico nacional tão essencial para enfrentar os desafios atuais e futuros. Destaca-se que a experiência internacional continua sendo uma fonte importante de informação, mas não tratam dos problemas específicos do sistema nacional e não pode, portanto, prevalecer sobre a experiência real e atual de mais de 10 anos de operação no sistema elétrico brasileiro.

6.2. OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE

O requisito de fator de potência-FP no PAC dos PR/ONS é essencial e visa garantir uma participação das CGE no controle de tensão do sistema. O FP igual a 0,95 significa exigência de injeção de potência reativa no montante igual a 1/3 da potência ativa injetada. Em CGE conectadas na rede básica através de linhas de transmissão mais extensas, a injeção de reativo pode ser fisicamente inviável respeitando-se os limites operacionais de tensão. Por outro lado, em locais de grande concentração de geração eólica, a aplicação deste requisito pode levar a um sobre dimensionamento de suporte de reativo. Por exemplo, para a SE João Câmara III 138kV com aproximadamente 1200MW instalados de geração eólica, este requisito, aplicado individualmente a cada CGE, resultaria num montante global de 400Mvar o que pode ser considerado excessivo. Outro aspecto importante é que na maioria dos casos, o atendimento deste requisito pelos agentes é realizado através de banco de capacitores- BC shunt manobráveis no nível de MV. O controle de tensão do sistema contando com vários BC pulverizados e dispersos nas instalações dos agentes pode não ser a forma mais simples operacionalmente, se comparado a dispositivos de controle automático instalados em locais estratégicos. Possivelmente, a justa exigência de participação das CGE no controle de tensão do sistema via requisitos de FP no ponto de conexão, pode não ser a forma mais adequada de recurso para controle de tensão sob a ótica de praticidade operacional.

6.3. OPERAÇÃO EM REGIME DINÂMICO

Os requisitos indicados no item 5.2.1 (Fig. 3) no modo de controle de tensão é considerado o mais adequado sendo adotado na maioria dos casos. Os modos de controle de “Q” e “FP” parecem ter a sua aplicação restrita a situações muito especiais e não conhecemos nenhum caso onde seja adotado no sistema brasileiro. O requisito do item 5.2.2 (Figura 4) não parece ter relevância para o sistema brasileiro e não se tem conhecimento de sua aplicação.



Os requisitos de desempenho em regime dinâmico foram introduzidos nos PR/ONS na versão mais recente com vigência em 01/01/2017 [01] e pode ser entendida como em processo de “maturação”. Cabe aqui destacar a questão de injeção de potência reativa durante defeitos, como mostrado na Figura 7 (item 8.8, do submódulo 3.6). Praticamente em todos aerogeradores modernos existe a possibilidade de injeção de reativo nas condições de defeitos (modo de controle “LVRT”). A experiência de alguns casos de grande concentração de eólica, a injeção de reativo durante o defeito pode resultar em elevadas sobretensões nos instantes imediatamente após a eliminação dos defeitos com possibilidade de desligamentos de aerogeradores. A característica da Figura 7 indica a injeção de reativo em valor crescente quanto menor for a tensão o que vai de encontro com a lógica convencional utilizada nos compensadores estáticos de bloquear a injeção de reativo quando a tensão fica abaixo de valores determinados evitando-se sobretensões em casos de defeitos próximos aos compensadores. A adoção das lógicas de subtensão a semelhança das adotadas nos compensadores estáticos pode ser interessante se coordenada com a curva da Figura 7. Nos casos onde não há necessidade de bloqueio, a injeção segundo a curva da Figura 7 pode ser uma estratégia adequada contribuindo com o restabelecimento do sistema.

Os requisitos de rampa de restabelecimento parecem se enquadrar entre os requisitos em maturação. Para o futuro, existem sugestões de rampas que evoluem em função da tensão de modo que o valor final da potência injetada não será necessariamente o valor inicial pré-defeito, mas um certo valor que o sistema é capaz de escoar na configuração pós-defeito, evitando-se colapso de tensão ou atuação de SEP desligando geração.

7. CONCLUSÃO

Dadas as características específicas da geração eólica, torna-se necessário requisitos específicos como definidos nos PR/ONS para não apenas mitigar os efeitos como garantir a participação das CGE nos controles do sistema.

A experiência mostra que alguns dos requisitos do PR/ONS são consolidados de forma bem-sucedida. Outros requisitos certamente necessitam de aprimoramento para que seus objetivos sejam alcançados plenamente. Por exemplo, a estratégia de injeção de potência reativa dos aerogeradores durante defeitos deveriam incluir a possibilidade de bloqueio a semelhança das lógicas utilizadas nos compensadores estáticos proporcionando maior flexibilidade de desempenho a ser adotado para cada caso particular.

Por ser uma fonte com grande variabilidade, é pertinente que as fontes de geração eólica contribuam com recursos de controle para a regulação de tensão do sistema. Entretanto, a exigência desta contribuição via fator de potência no PAC pode não ser a forma mais adequada notadamente sob o ponto de vista de



praticidade operacional em áreas de grande variabilidade da geração, destacando-se que a variabilidade da geração eólica torna-se relevante em áreas de grande concentração sendo um processo global e dinâmico.

Outros requisitos se mostram em fase de maturação e deverão evoluir nos próximos anos premidos pela necessidade que se estabelece com a crescente complexidade operacional decorrente do crescimento vertiginosos da geração eólica no Brasil com elevada concentração notadamente em áreas na região Nordeste.

REFERÊNCIAS

- [1] Procedimentos de Rede, ONS, Submódulo 3.6, Revisão 2016.12, Vigência 01/01/2017.
- [2] Valença R. B, Ramos A. J. P., Filho J.S.V. N, 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 – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba - PR, 22 a 25 de Outubro de 2017.

BIOGRAFIAS

Álvaro J. P. Ramos, formou-se em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1973, Msc pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá em 1975. Trabalhou na CHESF de 1974 até 1998, onde desenvolveu estudos elétricos em diversas áreas. Fundou a ANDESA em 1998 onde se encontra até o momento. É membro Sênior do IEEE e do CIGRÉ.

Rodrigo Bezerra Valença, formou-se em Engenharia Elétrica pela UPE em 2009, mestrado acadêmico na área de processamento de energia do PPGEE/UFPE em andamento. Trabalha na ANDESA desde 2010, onde desenvolveu e desenvolve estudos elétricos em diversas áreas. Atualmente é sócio da ANDESA. É membro do CIGRÉ.

José Sandro Valença do Nascimento Filho, formou-se em Engenharia Elétrica pela UPE em 2009, mestrado acadêmico na área de processamento de energia do PPGEE/UFPE em andamento. Trabalha na ANDESA desde 2010, onde desenvolveu e desenvolve estudos elétricos em diversas áreas. Atualmente é sócio da ANDESA.