



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - GPT

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

**IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EÓLICA NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO E TRANSMISSÃO:
ASPECTOS OPERATIVOS DE REGIME PERMANENTE, DINÂMICO E QUALIDADE DE ENERGIA**

**Álvaro J. P. Ramos (*)
ANDESA**

**Carmem L. Tavares
ANDESA**

**Dêibson J. G. de Sena
ANDESA**

RESUMO

Este artigo aborda aspectos da integração de geração eólica nos sistema de transmissão e distribuição com base na experiência de estudos realizados para inúmeras instalações com aerogeradores de diferentes tipos. São destacadas questões referentes aos impactos sobre a regulação de tensão do sistema e ao fator de potência no ponto de conexão em atendimento aos Procedimentos de Rede - PR.

É analisado como o desempenho dinâmico do sistema é afetado pela resposta das CGE e seus controladores frente a curtos-circuitos no sistema para os quais os aerogeradores devem permanecer conectados em atendimento a característica de suportabilidade exigida pelos PR.

PALAVRAS-CHAVE

Procedimentos de Rede – PR, Procedimentos de Distribuição - PRODIST, Centrais de Geração Eólica – CGE.

1.0 - INTRODUÇÃO

A inserção da energia eólica na matriz energética brasileira iniciou-se praticamente com o PROINFA a partir do ano 2005. Até então, não havia na engenharia brasileira experiência de projetos, estudos e, naturalmente, de operação de Centrais de Geração Eólica – CGE à exceção de alguns parques de pequeno porte já em operação. Como esperado, o PROINFA levou a um significativo esforço dos diversos segmentos da engenharia brasileira no sentido da capacitação desta tecnologia nos seus mais variados aspectos. Neste contexto, foi criado um grupo de trabalho envolvendo o CEPEL, ELETROBRÁS, CHESF, FURNAS, ELETROSUL e outros participantes visando definir e implementar nos programas de simulação do CEPEL os recursos necessários para a modelagem dos tipos de aerogeradores (Wind Turbine Generator – WTG) mais usuais que estavam para ser instalados no sistema brasileiro (3). Por outro lado, o ONS procedia ações para estabelecer os requisitos de conexão da geração eólica nos Procedimentos de Rede (2). Além destes fatos, as interações do ONS, das empresas de consultoria e de projeto com os fabricantes internacionais de WTG na realização de estudos e projetos dos parques eólicos do PROINFA possibilitaram o desenvolvimento da engenharia nacional em energia eólica para o estágio atual de desenvolvimento. A experiência acumulada com as CGE do PROINFA em operação, mesmo que ainda incipiente, se comparada a outros países com décadas de experiência no assunto, representa um avanço fundamental e essencial da nossa engenharia brasileira para fazer frente ao enorme desafio que temos de implementar e operar a partir de 2012 e 2013 aproximadamente 3900MW de energia eólica resultantes dos leilões de 2009 e 2010 e possivelmente outras CGE a serem definidas nos leilões a serem anunciados para 2011.

Este artigo tem como objetivo comentar e discutir várias questões relevantes e específicas da inserção de Centrais de Geração Eólica na Rede Básica e nos sistemas de distribuição considerando os seguintes aspectos:

- A) Pequeno porte dos aerogeradores em baixa tensão com transformadores elevadores interligados (na maioria) por uma malha de cabos subterrâneos em nível médio de tensão (13,8kV ou 34,5kV), consistindo o que se costuma denominar de sistema coletor. O sistema de conexão compreende a subestação elevadora para 69kV, 138kV ou 230kV e linhas de transmissão para conexão à distribuição ou na Rede Básica (230kV ou acima);
- B) Variabilidade da velocidade dos ventos causando variações na potência gerada e consequentemente no carregamento do sistema. Tais problemas podem ser relevantes principalmente nos casos de parques de grande porte conectados em sistemas “fracos”, ou seja, de baixa potência de curto-circuito;
- C) A variedade de tipos de aerogeradores existentes com características e recursos de controle distintos determinando diferentes impactos no desempenho dinâmico do sistema. Já se encontram em operação no sistema brasileiro aerogeradores do tipo mais simples, de indução a rotor de gaiola, até aerogeradores síncronos com conversor pleno (“Full converter”) onde é possível controle total da potência injetada no sistema;
- D) Entre os mais comuns controles disponíveis nos modernos aerogeradores destacam-se: controle de fator de potência; potência reativa; tensão terminal e tensão remota. A utilização de tais facilidades operativas ofertadas pelos controladores modernos demanda análises detalhadas do desempenho dos mesmos frente a perturbações do sistema, principalmente curtos-circuitos seguidos ou não de rejeições de carga;
- E) Alguns tipos de aerogeradores dotados de conversores injetam harmônicos no sistema enquanto os outros, sem conversores eletricamente inseridos no circuito do estator, não geram correntes harmônicas;
- F) Nos aerogeradores diretamente conectados, as variações de potência decorrentes das variações de velocidade do vento se refletem de forma mais intensa no sistema do que os aerogeradores tipo “Full Converter”. Tais variações dizem respeito a flutuações de tensão na rede cujo principal efeito é referido comumente como “flicker”.
- G) Como são máquinas diferentes das síncronas, a modelagem para a avaliação das contribuições destes aerogeradores em simulações de curtos-circuitos do sistema depende do tipo e das características de cada aerogerador em particular.

2.0 - AEROGERADORES E SISTEMAS COLETORES E DE CONEXÃO TÍPICOS

2.1 Tipos Mais Comuns e Características Gerais de Aerogeradores

Enquanto que as turbinas eólicas guardam muitas semelhanças entre si, os geradores podem ser de tipos bastante diferentes na sua concepção, controle e desempenho. Basicamente todas as turbinas dispõem de controle (lento) de alinhamento da nacelle com a direção do vento e de controle do ângulo das pás em relação a incidência do vento com as mesmas (“pitch control”) com o objetivo de evitar sobrecarga dos geradores em situações de velocidade de vento acima do nominal e para controlar a velocidade limitando as sobrevelocidades das pás em caso de defeitos (curtos-circuitos) no sistema.

Os principais tipos de aerogeradores em operação ou em instalação no sistema brasileiro são:

A) Tipo 1 - Gerador de indução, rotor a gaiola; B) Tipo 2 - Gerador de Indução com controle de resistência externa de rotor; C) Tipo 3 – Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG); D) Tipo 4 - Gerador Síncrono com Conversor Pleno (“Full Converter”) com controle de campo ou ímãs permanentes.

Destaca-se o fato de que os aerogeradores Tipo 1 e 2 consomem potência reativa e para operar com fator de potência unitário utilizam módulos de capacitores chaveados automaticamente. Não são capazes, via de regra, de operar com fator de potência capacitivo gerando potência reativa para o sistema. Alguns fabricantes anunciam que este aerogerador pode ser também disponibilizado com “STATCOM” possibilitando a operação capacitiva do mesmo, embora não se tenha informação da existência de aerogerador com tal recurso no Brasil.

Como qualquer máquina de indução, o processo transitório de remagnetização deste tipo de aerogerador, após a eliminação de curto-circuitos no sistema, demanda elevados montantes de potência reativa. Em sistemas fracos, tal solicitação de reativo pode comprometer o restabelecimento das tensões podendo até mesmo levar o sistema ao colapso.

Ao contrário das máquinas Tipo 1 e 2, os aerogeradores Tipo 3 (DFIG) não necessitam de fontes complementares de potência reativa, pois são capazes de controlar a potência ativa e reativa através do apropriado controle da excitação de campo realizado pelo conversor conectado ao rotor. Com isto, estes aerogeradores apresentam recursos de controle capazes de garantir um desempenho satisfatório durante e pós-defeitos e atender com facilidade aos requisitos de suportabilidade a afundamentos momentâneos de tensão, o denominado “Low Voltage Ride Through – LVRT”.

O aerogerador Tipo 4 é, do ponto de vista da rede, um “gerador estático eletrônico”, pois é fisicamente um conversor (“Voltage Sourced Converter – VSC”). A máquina síncrona física é isolada da rede através do “link DC”, o que reduz sensivelmente a influência do seu desempenho sobre o aerogerador conectado a rede que é, de fato, um conversor controlado. À semelhança dos aerogeradores Tipo 3, os Tipo 4 são capazes de gerar/absorver

potência reativa, além de dispor de grandes recursos de controle o que garante um desempenho adequado nas condições de defeitos da rede atendendo facilmente os requisitos LVRT.

2.2 Sistemas Coletores e de Conexão Típicos

A Figura 1 mostra um sistema coletor e de conexão típico de um parque eólico de 8 aerogeradores com duas linhas de aerogeradores de 4 unidades. Parques maiores praticamente têm a mesma estrutura com maior número de aerogeradores por linha e maior número de linhas. O sistema coletor interliga os secundários dos transformadores elevadores usualmente através de cabos subterrâneos no nível médio de tensão (MV) em geral 34,5kV ou 13,8kV para os parques menores. O nível de alta tensão (HV) comum é 69kV ou 138kV para conexões nos sistemas de distribuição e 230kV para conexões na Rede Básica. É comum o transformador da SE coletora (MV/HV) dispor de comutador de tapas em carga em conexões, principalmente, na distribuição, permitindo ajustar a regulação interna do parque aos perfis de tensão praticados no sistema.

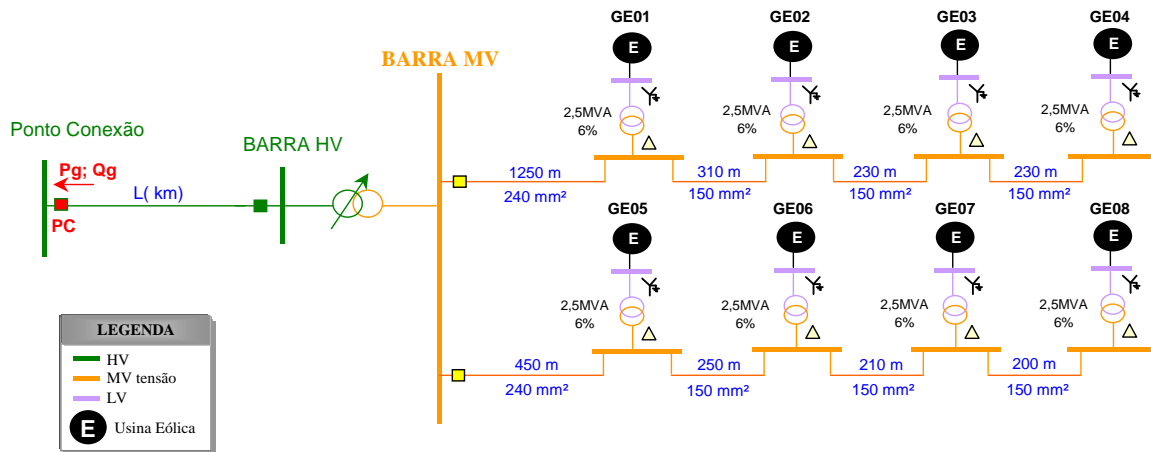


FIGURA 1 – Configuração Típica de Sistema Coletor e de Conexão

3.0 - IMPACTO DAS CGE EM REGIME PERMANENTE

3.1 Escoamento da Potência das CGE

A potência gerada nas CGE deve escoar através do sistema de conexão e pelo sistema elétrico respeitando os limites térmicos das linhas e transformadores em qualquer condição de carga, cenários de intercâmbios e nas configurações normais e contingências simples. Trata-se pois, da prospecção de várias situações operacionais esperadas, avaliando-se possíveis sobrecargas no sistema, considerando-se geração máxima das CGE.

Entretanto, um outro aspecto igualmente importante é a verificação da capacidade de escoamento sob ponto de vista de estabilidade de tensão. Em sistemas fracos com longas linhas, os limites de transmissão por estabilidade de tensão podem ser inferiores aos limites térmicos das linhas e representa, nestes casos, o fator limitante.

O limite de estabilidade corresponde à condição operacional para a qual ocorre o fenômeno de colapso da tensão. Evidentemente que este não pode ser o limite a ser observado, porém um valor menor que garanta a controlabilidade das tensões do sistema. Quando o carregamento da linha se aproxima dos limites, a controlabilidade da tensão se torna difícil onde uma maior injeção de potência reativa se faz necessário para um mesmo incremento de potência ativa transmitida. Nestes casos, a sensibilidade da tensão e, em consequência, a sua controlabilidade se torna crítica e se agrava à medida que o carregamento do sistema se eleva até o ponto de colapso total. Quanto mais próximo do ponto de colapso, mais sensível estarão as tensões do sistema para variações de potência, o que pode ser crítico principalmente para CGE com aerogeradores Tipo 1 e 2. Neste tipos de aerogeradores, os reflexos das variações da velocidade do vento sobre a potência elétrica injetada são mais acentuados do que nos Tipo 3 e 4 ao mesmo tempo em que os recursos de controle são muito mais limitados. Em condições críticas pode ser essencial equipamentos de controle dinâmico de tensão tipo STATCOM.

A Figura 2 mostra um sistema radial que é uma simplificação de um sistema real no nível 69kV onde se pretende injetar 20MW na Barra 6. A Figura 3 mostra como as tensões nas barras 4, 5 e 6 variam com o crescimento da potência injetada com fator de potência unitário. Esta característica $P \times V$ mostra que as tensões nos barramentos 4, 5 e 6 tornam-se muito sensíveis a variações de potência, aproximadamente 3%/MW na barra 6, quando $P=13,5\text{MW}$. O valor 20MW está além do ponto de colapso. Com a instalação de um Compensador Estático – CE com capacidade de 0 a 15Mvar, o limite de estabilidade se estende a aproximadamente 22MW quando o CE está praticamente no seu limite de Mvar. Observa-se, entretanto que, ao atingir a capacidade máxima do CE o sistema entra em colapso. Este é um indicativo de que a estabilidade da tensão depende essencialmente do CE. Ademais,

o desempenho dinâmico do controle das tensões do sistema estará fortemente dependente do controle do CE. Esta é apenas uma análise de regime permanente que avalia tão somente as condições de controlabilidade do sistema.

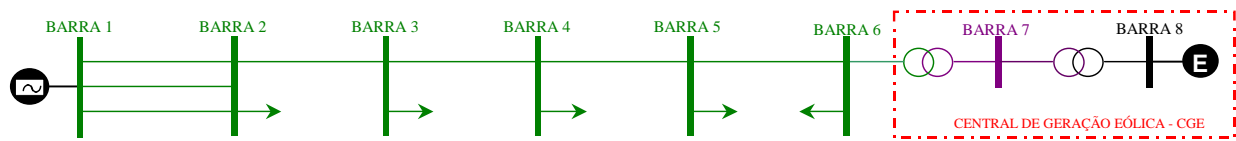


FIGURA 2 – Sistema radial com CGE.

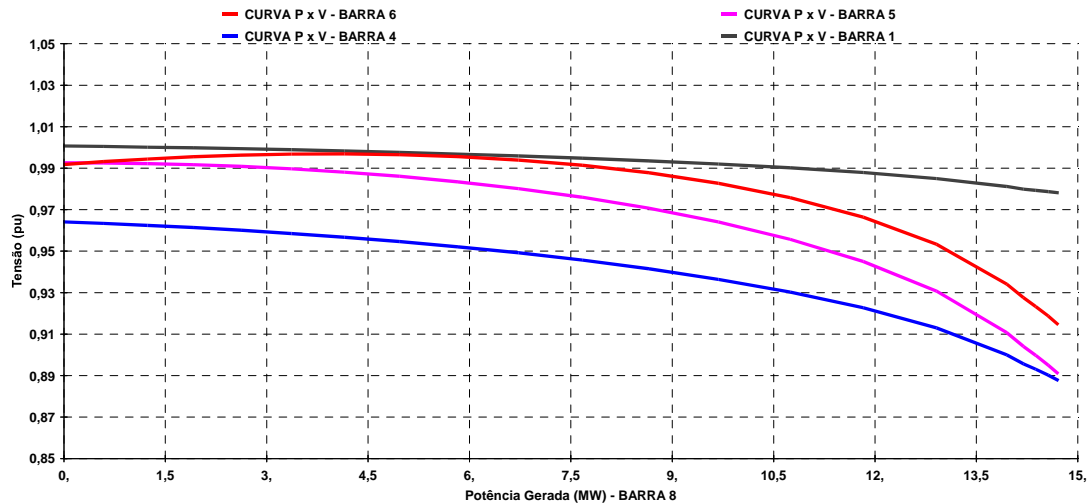


FIGURA 3 – Característica P x V das barras 1, 6, 5 e 4 para injeção de potência pela CGE na barra 8. Configuração normal.

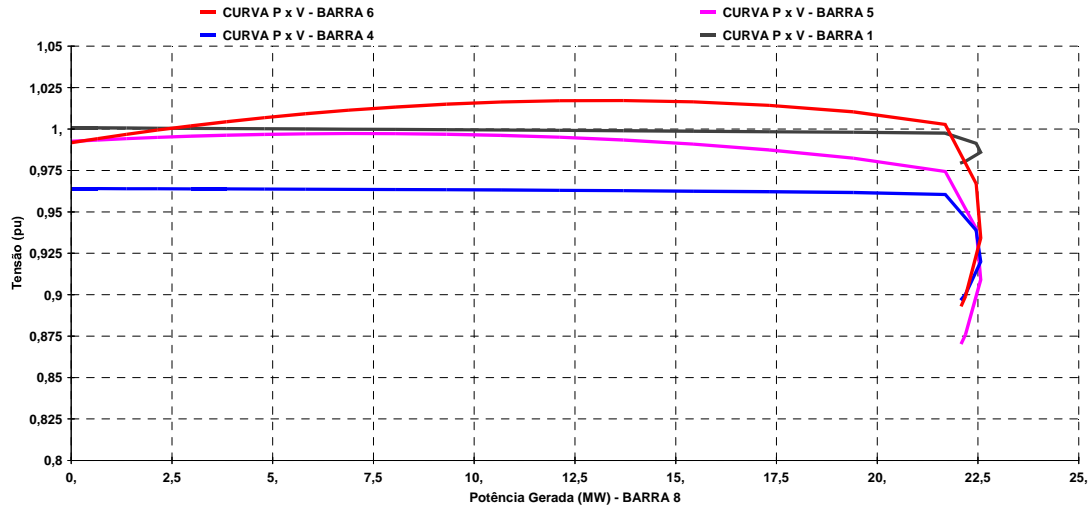


FIGURA 4 - Característica P x V das barras 1, 6, 5 e 4 para injeção de potência pela CGE na barra 8 com um CE (0; 15Mvar) na barra 4.

3.2 Impacto sobre a regulação do sistema e Requisitos de fator de Potência no Ponto de Conexão

A regulação de tensão no sistema elétrico representa um conjunto de ações do operador para manter as tensões dentro de faixas pré-estabelecidas para fazer frente às variações de carga e, em consequência, de carregamento do sistema de transmissão. Naturalmente ao injetar potência em diversos pontos do sistema, as CGE interferem neste processo impactando de alguma forma neste problema. Por esta razão, os Procedimentos de Rede, submódulo 3.6, parágrafo 8, estabelece requisitos técnicos mínimos para conexão de CGE que definem condições de fator de potência no ponto de conexão de forma a assegurar ao operador os meios de controle de tensão do

sistema em regime permanente considerando-se os impactos da operação das CGE. É exigido que, no ponto de conexão, a CGE “deve propiciar os recursos necessários para, em potência ativa nominal e quando solicitado pelo ONS, operar com fator de potência indutivo ou capacitivo dentro da faixa 0,95 indutivo para 0,95 capacitivo”.

Para atender a estes requisitos, as CGE normalmente contam com a capacidade de gerar/absorver potência reativa dos aerogeradores (Tipo 3 e 4), com a ação do comutador de tapas do transformador MV/HV e eventualmente a instalação de capacitores no barramento MV ou HV (ver Figura 1). Como também os aerogeradores Tipo 1 e 2 são capazes de absorver potência reativa, dificilmente haverá algum caso de necessidade de instalação de reatores shunt para atender ao requisito acima. Estes recursos mostram-se efetivos quando a linha de conexão (da barra HV para a barra de conexão da Figura 1) é curta. Quando a linha de conexão é longa, a injeção de potência reativa no ponto de conexão para atender ao fator de potência 0,95 capacitivo pode se tornar fisicamente inviável com os recursos de controle locais da SE da CGE. Nestes casos, será necessário que o acessante instale compensação de reativo no ponto de conexão. Sob o ponto de vista restritamente técnico, o ideal seria a instalação de banco de capacitores chaveáveis no barramento do ponto de conexão sendo o fator de potência computado com a inclusão desta fonte de potência reativa.

Um outro aspecto relevante e que já vem ocorrendo em instalações em operação é a condição de operação em vazio das CGE. Quando a velocidade dos ventos fica abaixo do valor denominado “cut in” ocorre o desligamento automático de todos os aerogeradores permanecendo em vazio todo o sistema coletor e de conexão, impossibilitando o uso da faixa indutiva dos aerogeradores. Quando a linha de conexão (Figura 1) é longa, em 230kV por exemplo, o seu efeito capacitivo acrescido dos efeitos capacitivos dos cabos subterrâneos do sistema coletor pode acarretar uma injeção excessiva de potência reativa prejudicial para o sistema elétrico. O desligamento da linha de conexão não é conveniente dado que os aerogeradores serão automaticamente reconectados tão logo a velocidade dos ventos se restabeleça acima do “cut in”. Embora os Procedimentos de Rede ainda não estabeleçam exigências explícitas em seu texto sobre esta questão, é necessário que o acessante deva compensar os efeitos capacitivos mencionados, por exemplo, com instalação de reatores shunt chaveáveis.

3.3 Impacto sobre os Níveis de Curto-Circuito do Sistema

A contribuição dos aerogeradores para curto-circuitos no sistema é uma informação necessária para se avaliar os impactos sobre a capacidade de interrupção de disjuntores e para os ajustes e coordenação das proteções. Os programas convencionais se utilizam da representação das máquinas síncronas para cálculo das contribuições de curto-circuito através da representação clássica de tensão através de reatância transitória ou subtransitória. Entretanto, os aerogeradores não são máquinas síncronas conectadas ao sistema e sim máquinas de indução ou síncrona conectadas através de conversores de forma que a contribuição destas são absolutamente diferente das máquinas síncronas e dependem também da configuração de projeto de cada aerogerador. Para os aerogeradores Tipo 1 e 2 a contribuição se assemelha a de uma máquina síncrona porém, com um decaimento mais rápido e para um valor nulo que corresponde à completa desmagnetização da máquina. A Figura 5 mostra a evolução da corrente para um curto-circuito trifásico utilizando o modelo completo no ANATEM. O pico inicial da corrente sugere uma reatância transitória da ordem de 20%. Destaca-se porém, que 30ms após o defeito a corrente de curto é praticamente igual a zero.

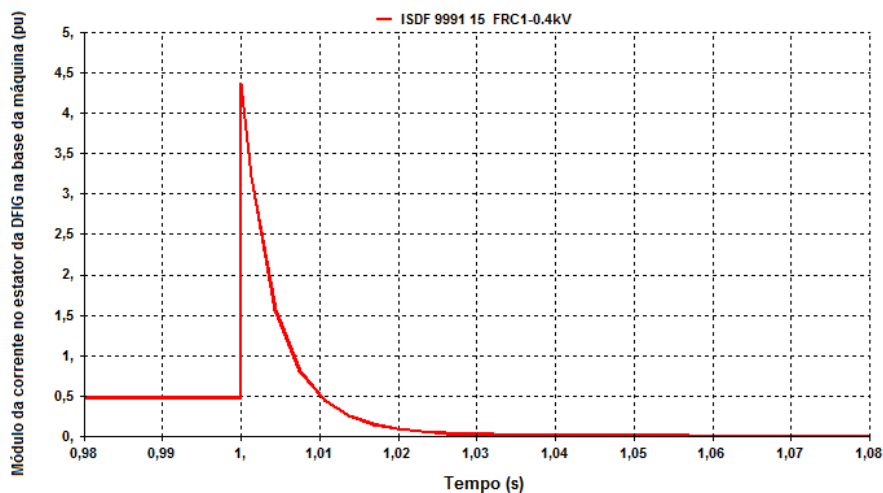


FIGURA 5 - Corrente de curto-circuito trifásico de um aerogerador Tipo 2 obtido do modelo detalhado no ANATEM.

Nos aerogeradores Tipo 4, os conversores através dos quais os aerogeradores se ligam ao sistema são dotados de sistema de controle de corrente de atuação muito rápida de forma que, os aerogeradores contribuem com valores constantes de corrente, cuja magnitude deve ser informada pelo fabricante. Nos programas de curto-circuito estes aerogeradores são, portanto, representados como fontes de corrente.

4.0 - IMPACTO DAS CGE EM REGIME DINÂMICO

4.1 Aspectos Conceituais

Os denominados estudos dinâmicos ou estudos de estabilidade analisam o desempenho do transitório eletromecânico do sistema elétrico onde a dinâmica, propriamente dita, está relacionada ao equilíbrio eletromecânico das máquinas síncronas e aos respectivos controles, além de outros controladores do sistema, tais como compensadores estáticos, compensação série controlada, controles associados ao sistemas HVDC, etc. Nestes estudos, a rede elétrica é representada estaticamente pelas equações algébricas e complexas de fluxo de carga. Nos estudos de estabilidade de UHE e UTE, a perda de sincronismo e o amortecimento das oscilações rotóricas e seus efeitos sobre as tensões do sistema, resultantes de defeitos no sistema, são os elementos principais dos estudos. Nos estudos de desempenho dinâmico de CGE, deve-se ter em mente que os aerogeradores são máquinas assíncronas que não perdem estabilidade, sendo muitas delas Tipos 3 e 4 cuja resposta é inteiramente determinada pelos controles dos conversores. Assim, em função do tipo de aerogerador e das estratégias de controle de cada fabricante em particular, podemos ter desempenhos transitórios bastantes distintos.

Os controles de potência ativa e potência reativa/tensão são, pois, determinantes no comportamento das CGE nas perturbações do sistema.

4.2 Modos de Controle dos Aerogeradores

Nos aerogeradores tipo 1 não há controle de potência enquanto nos aerogeradores tipo 2 existe um controle em faixa muito reduzida através do ajuste de resistência externa do circuito de rotor. Nestes tipos 1 e 2, o controle de potência reativa se limita ao chaveamento de módulos de capacitores. São controles lentos (20 a 30 segundos entre comando de chaveamento) e não interferem no desempenho dinâmico dos aerogeradores.

Nos aerogeradores tipo 3 e 4 estão disponíveis controle de potência ativa e reativa através dos controladores dos conversores. O controle de potência ativa é voltado para maximizar a potência que se pode extrair do vento em determinado momento quando a potência está abaixo da nominal. Quando a velocidade do vento é maior do que a nominal, o controle, via ângulo das pás, tem o objetivo de evitar sobrecarga no aerogerador.

Com relação a potência reativa, em geral os aerogeradores mais modernos oferecem pelo menos três opções de controle: a) Fator de potência constante - Controle F; b) Potência reativa constante – Controle Q; c) Tensão terminal ou remota controlada – Controle V.

A seleção do modo de controle deverá ser em função das características e especificidades de cada sistema em particular.

4.3 Desempenho em Pequenas Perturbações

Trata-se do desempenho das CGE frente a perturbações de pequena severidade (defeitos em pontos afastados) com afundamentos limitados de tensão (acima de 80%, por exemplo). As variações de tensão decorrentes das variações de potência elétrica causadas pelas variações na velocidade dos ventos também se enquadram neste tipo de perturbações.

A seleção do modo de controle F, Q ou V influencia substancialmente o comportamento dinâmico do sistema notadamente em casos em que a relação entre a potência instalada e a potência de curto-circuito, a denominada Short Circuit Ratio – SCR é reduzida. A SCR é uma medida da robustez do sistema no ponto e representa o inverso da sensibilidade da tensão com relação a variações de potência sem levar em conta o carregamento do sistema. Com a elevação acentuada do carregamento do sistema, a tendência é uma elevação da sensibilidade da tensão com relação a variações de potência maior do que a expressa pela potência de curto-circuito (3). Por exemplo, a operação do sistema com potência acima de 13MW, cuja curva $P \times V$ é mostrada na Figura 3, é um indicativo da necessidade de controladores especiais com capacidade de reativo e resposta rápida apropriados. Por exemplo, um aerogerador tipo 1 ou 2 certamente não apresenta desempenho aceitável na região acima de 10MW da Figura 3.

4.3 Desempenho em Grandes Perturbações

As denominadas grandes perturbações referem-se principalmente a curtos-circuitos no sistema. Considerando que o aerogerador atende ao requisito de suportabilidade a afundamentos de tensão dos Procedimentos de Rede (LVRT) não se espera que haja desligamento do aerogerador para defeitos eliminados em tempos típicos de Rede Básica. Para defeitos nos sistemas de distribuição, os tempos de eliminação podem atingir valores relativamente altos, da ordem de 1,0 segundo ou mais. No período pós-defeito, quando o aerogerador de indução demanda elevados valores de potência reativa no processo de remagnetização da máquina, o restabelecimento das tensões pode se tornar muito difícil nos casos em que o sistema opera com carregamento muito elevado.

A Figura 6 mostra a curva P x V de um sistema radial indicando dois pontos quando se injeta 30MW (A) e 33MW (B). De zero até 16MW o aumento de potência implica em elevação da tensão dado que nesta faixa se tem uma redução do carregamento do sistema, pois a carga existente passa a ser suprida pela geração eólica.

A resposta do sistema para defeito eliminado em 800ms é mostrado na Figura 7 em vermelho para a condição de 30MW (ponto A) e azul para a condição de 33MW. No caso foi utilizado um aerogerador tipo 1. Observa-se um restabelecimento da tensão mais difícil em função de apenas 3MW a mais na geração da CGE o que denota uma degradação das condições de controlabilidade do sistema como sugerido pela curva P x V. Na figura 8 é mostrado a mesma simulação com 30MW (ponto A) com o aerogerador tipo 1 (vermelho) e tipo 4 (azul), com notável diferença na recuperação transitória da tensão. Neste caso, as condições menos favoráveis em termos de carregamento foram compensadas pela capacidade de reativo e resposta do aerogerador tipo 4.

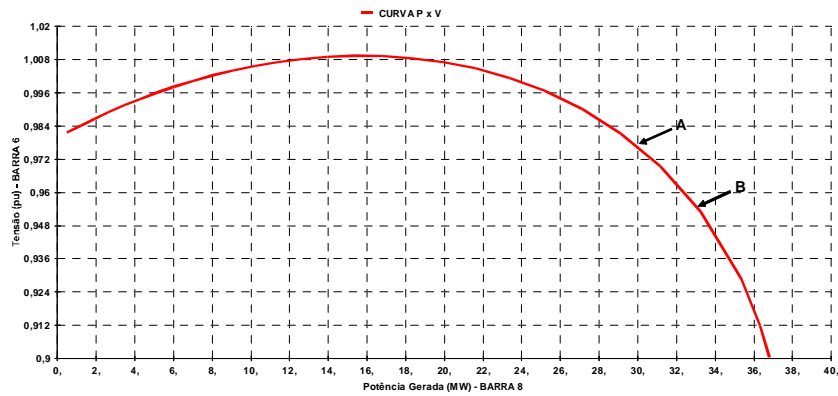


FIGURA 6 - Característica P x V.

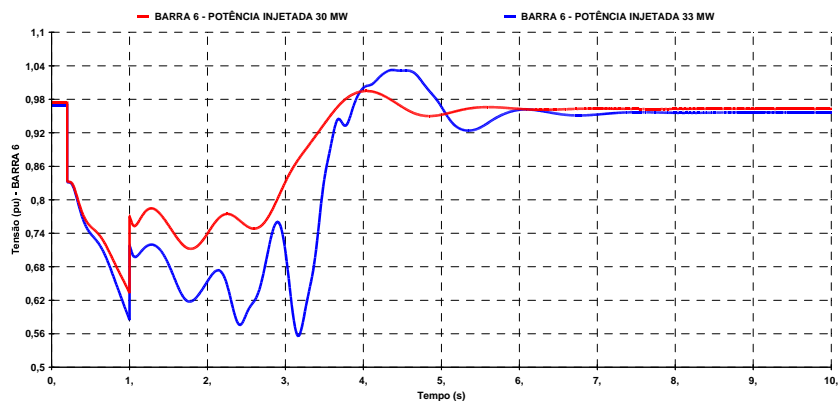


FIGURA 7 – Tensão no Ponto de conexão frente à ocorrência de um defeito monofásico com tempo eliminação de 800ms, para despacho diferenciado de 30MW e 33MW, utilizando aerogerador Tipo 1.

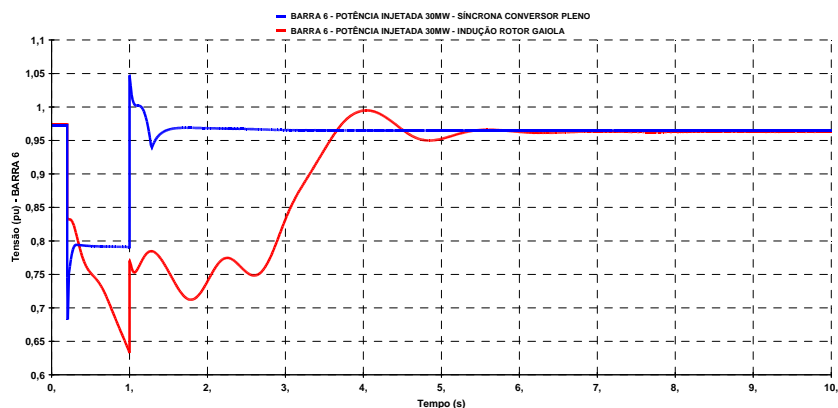


FIGURA 8 - Tensão no Ponto de conexão frente à ocorrência de um defeito monofásico com tempo eliminação de 800ms, considerando despacho de 30 MW, utilizando aerogeradores Tipo 1 (vermelho) e Tipo 4 (azul).

Deve entretanto, ser ressaltado que em casos críticos de sistemas de baixa potência de curto-circuito, o controle de tensão por fontes rápidas de potência reativa, do próprio aerogerador, como no caso apresentado ou através de equipamentos auxiliares, tais compensadores estáticos ou STATCOM, podem levar a instabilidade dos mesmos como apontado em (5). Este problema não é revelado em simulações de transitórios eletromecânicos, sendo detectado apenas através de simulações de transitórios eletromagnéticos com a devida representação da dinâmica da rede elétrica.

5.0 - IMPACTO NA QUALIDADE DE ENERGIA

Os impactos da operação das CGE com relação a qualidade de energia estão associados principalmente a questão do efeito “flicker” e de harmônicos. Trata-se da avaliação dos níveis de perturbação causados na tensão que se refletem em variação de luminosidade das lâmpadas (“flicker”) medida através dos indicadores clássicos das Normas IEC e adotados pelos Procedimentos de Rede do ONS. Os impactos são medidos pelos níveis de “flicker” (cintilação) na região de influência da CGE resultantes das variações de tensão decorrentes da operação em regime permanente das CGE, das correntes de “inrush” e de manobras internas dos aerogeradores. Em princípio, os aerogeradores diretamente conectados tipos 1 e 2 são mais promissores de apresentar indicadores de “flicker”. Os aerogeradores tipo 4, por não estarem conectados diretamente e sim através de conversores provocam impacto menores de flicker comparados com os aerogeradores com conexão direta.

Aerogeradores tipos 1 e 2 não injetam correntes harmônicas no sistema e, portanto não provocam impactos desta natureza. Nos aerogeradores tipo 3 (DFIG) as correntes do conversor conectado ao estator apresentam conteúdo harmônico que é injetado no sistema. Nos aerogeradores tipo 4 (“Full Converter”) a corrente total do aerogerador é resultado dos chaveamentos dos conversores e apresenta conteúdo harmônico.

Os impactos da injeção de harmônico dependem não apenas do perfil de injeção informados pelo fabricante, mas também das impedâncias do sistema vista dos pontos de injeção em diversas configurações e condições operativas do sistema.

Os estudos de harmônicos envolvem incertezas associadas a modelagem das fontes de corrente, da composição fasorial dos harmônicos, da modelagem dos elementos do sistema e das cargas, entre outros. Assim, é essencial que campanhas de medição sejam realizadas antes e após a entrada em operação das CGE para uma avaliação mais confiável dos impactos e para definição da necessidade eventual de filtros.

6.0 - CONCLUSÃO

A avaliação dos impactos da inserção de geração eólica no sistema elétrico sob os aspectos de regime permanente, dinâmico e qualidade de energia, envolve aspectos específicos em função de cada tipo de aerogerador e das características de cada ponto de conexão. Sistemas de baixa potência de curto-circuito onde o parâmetro SCR (“Short Circuit Ratio”) é baixo merece análises detalhadas com atenção ao carregamento do sistema e ao tipo de aerogerador utilizado. A seleção dos modos de controle disponíveis nos aerogeradores modernos para melhor adequação as características e necessidades do sistema também representa um dos pontos vitais nos estudos de inserção da CGE requerendo familiaridade com o sistema elétrico e com as características de controle dos aerogeradores.

Muitas das CGE em operação no sistema são de porte tal que seu impacto sobre o sistema se limita à área do sistema onde o mesmo se conecta. Com a instalação de CGE de grande porte e em quantitativos expressivos como previstos a partir de 2012, estima-se que a influência destas passem a produzir impactos no desempenho dinâmico global do SIN no que se refere às suas interligações. Questões como estas representam certamente grandes desafios para o futuro próximo.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CEPEL CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; Programa ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos - V10.04.03; Abril 2010; Programa ANAREDE – Programa de Análise de Redes – V09.06.02; Abril 2010.
- (2) “Procedimentos de Rede” do ONS, Submódulos 2.8 e 3.6.
- (3) GRUPO DE TRABALHO CEPEL - ELETROBRAS – CHESF - FURNAS – ELETROSUL - ONS, “Modelos para Análise Eletromecânica de Geradores Eólicos - Procedimentos para Preparação de Casos de Simulação com Máquina de Indução Duplamente Alimentada nos Programas ANAREDE e ANATEM”. Setembro 2004.
- (4) Álvaro J. P. Ramos, Daniel P. Lira “Power Quality Degradation Caused by Congested Transmission System and Dynamic Loads “, Artigo apresentado no simpósio “THE INTERNATIONAL POWER QUALITY CONFERENCE & EXHIBIT”, realizado de 1 a 5 de Outubro de 2000 em Boston/EUA.
- (5) A. J. P. Ramos, H. Tyll, “ Dynamic Performance of a Radial Weak Power System with Multiple SVC”. IEEE Trans on Power System, Vol. 4, pag. 1316 – 1325, October 1989.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Álvaro J. P. Ramos, nascido em 15/02/1951 em Recife, Graduado pela Escola de Engenharia da UFPE em 1973 e Mestrado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá em 1975. Foi chefe da Divisão de Estudos Elétricos Especiais da Operação da CHESF (1988-1998) e atualmente é diretor da ANDESA empresa de consultoria fundada em 1998.



Carmem Lúcia Tavares, nascida em 02/03/1984 em Toritama-PE, Graduada pela Escola de Engenharia da UPE em 2006. Atualmente exerce o cargo de Engenheira Analista de Sistema de Potência na ANDESA desde 2007.



Dêibson J. G. de Sena, nascido em 24/03/1981 na cidade do Cabo de Santo Agostinho, Graduado pela Escola de Engenharia da UPE em 2007. Atualmente exerce o cargo de Engenheiro Analista de Sistema de Potência na ANDESA desde 2008.