

Análise da Integração de Usinas Eólicas na Rede Elétrica

Selênio R. Silva*, Eduardo L.R. Pinheiro*, Eduardo N. Cardoso*, Kleber F. da Silva**, Edmilson C. Santana***, Gustavo S. Checcucci***, Juan J. J. P. Franco***, José A. S. Brito***

* UFMG, ** UNIFACS, *** COELBA.

RESUMO

Este trabalho propõe contribuir para a discussão sobre modelos matemáticos para representação de sistemas de conversão de energia eólica e procedimentos de análise para estudos de inserção de usinas eólicas na rede, tendo como ponto de partida as tecnologias em turbinas eólicas a velocidade constante e com controle ativo de passo. São apresentados os modelos básicos de uma usina eólica e sua aplicação nos estudos necessários para avaliação dos critérios para inserção nas redes elétricas, utilizando aplicativos diversos existentes no mercado. Um estudo de caso de uma usina real, a ser interligada na rede de distribuição, ilustra a aplicação dos conceitos apresentados.

PALAVRAS-CHAVES

Usinas eólicas; integração na rede elétrica; qualidade da energia elétrica; modelos.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica tem sido assunto de estudos desenvolvidos no Brasil há algumas décadas, contudo, o impacto da instalação de turbinas eólicas na rede elétrica é tema relativamente recente. Vários entre os trabalhos publicados no país foram conseqüência da implantação das primeiras usinas eólicas, principalmente a Usina do Morro do Camelinho (CEMIG) e a Usina de Taiba (COELCE). Estes trabalhos enfocaram, em caráter experimental, a avaliação da qualidade da energia gerada [1] e já indicavam as conseqüências do contínuo avanço tecnológico dos artefatos eólicos [2-3].

Em face às autorizações de instalação concedidas pela ANEEL em torno de 6 GW em usinas eólicas no país, à conscientização dos órgãos governamentais (Lei 10.438/2002), das concessionárias de energia, dos centros de pesquisa e universidades e interesse dos fabricantes e produtores independentes, os estudos de conexão de parques de geração eólica no Brasil tomam um caráter emergencial. Um enorme volume de temas carecem de abordagem, de normalização, de critérios e de procedimentos de análise.

Este trabalho propõe contribuir para o desenvolvimento de modelos matemáticos para representação de sistemas de conversão de energia eólica, tendo como ponto de partida os sistemas a velocidade constante e turbinas com controle ativo de passo. O foco do trabalho encontra-se na

modelagem para fins de estudos dinâmicos que permitam avaliar o desempenho desses sistemas em redes de distribuição nacionais.

Serão avaliados os aspectos dinâmicos dos geradores de indução, das turbinas eólicas e a forma de representação dos regimes de vento, suas considerações, sua complexidade e sua adequação para os estudos pretendidos. Serão avaliadas as metodologias de análise para fins de representação do impacto nos perfis de tensão do sistema (regime permanente), das variações de tensão (faltas, perdas de geração, variações de velocidade de vento, dentre outros) e das flutuações de tensão.

Os programas comerciais existentes e a forma de adequar a modelagem desenvolvida serão discutidos, buscando fornecer alternativas para a análise do desempenho destes sistemas de geração quando instalados em redes de baixa potência de curto-circuito.

Um estudo de casos ilustrará a metodologia de análise, levando a discussão para os aspectos práticos de uma instalação real e contribuindo para a avaliação de medidas e ações de expansão necessárias à viabilização da instalação desses parques eólicos no país.

II. QUALIDADE EM USINAS EÓLICAS

Os principais distúrbios causados na rede elétrica pela conexão das fontes eólicas, que podem afetar significativamente a qualidade da energia fornecida, são:

- Consumo excessivo de potência reativa [4];
- Variações no perfil de tensão fornecida aos consumidores próximos [5];
- Sobretensões e sobrefreqüências em situações de ilhamento [4];
- Injeção de harmônicos [6];
- Flutuações de tensão [6-8].

A solução para esses problemas pode vir da combinação de várias ações, tais como: forma de operação dos geradores, alterações nos componentes da rede elétrica, seleção do tipo de conexão dos geradores à rede elétrica, adição de novos equipamentos, avaliação do regime local de ventos, seleção da tecnologia de sistemas eólicos a ser

utilizada, entre outras. Contudo são extremamente dependentes das características dos equipamentos, do sistema e do sítio de instalação do parque eólico.

III. PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

Diversos estudos são necessários para avaliar o impacto da instalação de usinas eólicas na rede elétrica e garantir as condições efetivas de operação do sistema, sem prejuízos na qualidade da energia fornecida aos consumidores. No passado, simples cálculos manuais foram utilizados, mas atualmente vários programas computacionais estão disponíveis. Contudo, considerável atenção é necessária quando do uso destes programas, pois a maioria foi desenvolvida primariamente para investigar sistemas elétricos com geração convencional de energia e, logo, não se aplicam diretamente para estudos de conexão de usinas eólicas.

A . Variações de Tensão

A avaliação das variações lentas de tensão é geralmente realizada pela análise do regime permanente dos sistemas elétricos que integram ou integrarão turbinas eólicas.

O método mais simples de análise requer apenas o cálculo da máxima variação de tensão no ponto de conexão da usina eólica. Por este método, a variação de tensão é calculada por:

$$\Delta V (\%) = 100 \frac{S_{WT}}{S_{cc}} \cos(\varphi_{cc} - \phi_{WT}) \quad (1)$$

onde S_{WT} é a potência nominal da usina eólica; S_{cc} é a potência de curto-circuito da rede no ponto de conexão; φ_{cc} é o ângulo da impedância de curto-circuito da rede no ponto de conexão e ϕ_{WT} é o ângulo do fator de potência da usina eólica na condição de potência nominal.

Este método, extremamente simplificado, adotado em várias normas internacionais e em normas técnicas de concessionárias de energia, ignora completamente o significativo efeito de cargas no perfil de tensão da rede.

O método mais apropriado utiliza programas de fluxo de potência que incluam uma efetiva representação de geradores de indução. Um simples programa de fluxo de carga já permite uma análise adequada da integração de sistemas eólicos, porém alguns programas comercialmente disponíveis permitem representar a distribuição diária de carga e da geração, determinando o desempenho do sistema em um período de tempo e permitindo a obtenção da distribuição probabilística dos perfis de tensão [5].

Os estudos devem sempre avaliar o perfil de tensão nas barras consumidoras frente às situações extremas de carga (pesada e leve) e da geração eólica (nominal e desligada).

A modelagem de uma usina eólica com geração assíncrona em um fluxo de potência normalmente é feita como uma geração fixa em uma barra de carga (PQ), apesar deste modelo não representar a dependência da potência reativa com a tensão no ponto de conexão. Em uma aborda-

gem mais detalhada, a usina deve ser representada por uma barra PX, onde o consumo de potência reativa pode ser representado por um reator na barra de conexão, calculado pela reatância de magnetização dos geradores de indução. A melhor representação de usinas eólicas pode ser obtida se a máquina de indução é representada por seu circuito equivalente convencional em regime permanente [8].

B . Flutuações de Tensão

Atualmente, não existem métodos simplificados para cálculo dos níveis de flutuação de tensão (“flicker”) em redes elétricas, na fase de projetos de usinas eólicas. As técnicas existentes usam estimativas baseadas em medições padronizadas de “flicker”, feitas em condições conhecidas em laboratórios, convertidas para parâmetros de uma rede fictícia padronizada [9-10].

Em [7] avaliam-se os níveis de “flicker” através de duas abordagens. Uma abordagem simples é proposta para identificar as barras críticas do sistema onde níveis severos de flutuação de tensão podem ocorrer. Constitui um método equivalente ao utilizado para avaliar as variações lentas de tensão, considerando flutuações típicas de 20% da potência ativa da usina eólica. Uma abordagem complexa utiliza simulação dinâmica, usual em estudos de estabilidade transitória, representando com detalhe as unidades geradoras e a dependência das cargas com a tensão e a frequência.

A avaliação simplificada proposta pela norma IEC 61400-21[10] consiste da análise do desempenho do sistema em duas condições operativas específicas da usina eólica: em condições de chaveamento de unidades geradoras ou banco de capacitores, e em condições de operação contínua.

C. Transitórios Eletromecânicos

Os programas de estabilidade transitória permitem a investigação de como a geração eólica integrada irá responder frente a distúrbios da rede elétrica e como distúrbios de variação de níveis de geração podem afetar os perfis de tensão no sistema. A representação de máquinas de indução é freqüentemente simplificada nos programas usuais, pela modelagem exclusiva da dinâmica mecânica. Este tipo de modelagem não é adequado para investigar problemas de colapso de tensão em usinas eólicas.

Esse método pode ser utilizado para estudo do impacto dos seguintes distúrbios: variações de velocidade de vento, chaveamento de unidades geradoras, faltas simétricas ou assimétricas na rede elétrica e conseqüentes perdas de linhas de transmissão e variações ou chaveamento de unidades de compensação de reativos ou das ações de controle ou comando de tensão.

D. Transitórios Eletromagnéticos

Entre as mais avançadas ferramentas para estudos em sistemas elétricos, os programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos permitem, normalmente, uma representação efetiva da integração de sistemas eólicos. Modelos

detalhados de geradores de indução e de conversores estáticos de potência geralmente integram os principais programas existentes. Simulações eletromagnéticas não são rotina comum em projetos de integração de usinas eólicas, mas, em face da possibilidade de representar uma gama variada de equipamentos, pode ser uma ferramenta útil para investigar problemas específicos.

Esse método pode ser utilizado para estudo do impacto dos distúrbios citados anteriormente, além de estudos de penetração harmônica no domínio do tempo e de sobretensões transitórias.

IV. PROGRAMAS UTILIZADOS

Neste trabalho, três programas comercialmente disponíveis foram utilizados e analisados para estudos da integração de usinas eólicas em redes elétricas. Para estudo de fluxo de carga, foi utilizado o Programa de Análise de Redes – ANAREDE – do CEPEL. Para estudos de transitórios foram utilizados: o Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM – do CEPEL, o PSCAD/EMTDC – Versão V3 da Manitoba HVDC Research Centre Inc. e o MATLAB/Simulink Versão 6.5 da MathWorks.

O ANAREDE [11] na sua aplicação ao estudo de fluxo de potência pode implementar modelos de usinas eólicas em dois formatos usuais: como barra PQ ou como barra PX. Está última é uma barra PQ, onde se aloca valor nulo para o fornecimento/consumo de potência reativa e simula-se o consumo/fornecimento de potência reativa por reator/capacitor localmente instalado. A vantagem desta última abordagem é de garantir que o consumo/fornecimento de reativos seja função não apenas da potência gerada, mas, e principalmente, da tensão na barra considerada.

Este programa permite também a instalação de motores de indução na barras do sistema, que poderia ser útil para representar, com maior precisão, usinas eólicas com geração assíncrona. Contudo, na forma que os modelos foram desenvolvidos, o programa não aceita a indicação de carregamento negativo que permitiria a simulação de geradores de indução.

O programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM [12] é uma aplicação computacional para a realização de estudos de estabilidade à frequência fundamental tanto na operação como no planejamento de sistemas elétricos de potência.

O ANATEM não possui modelos específicos para representação de usinas eólicas, faltam modelos para turbinas eólicas e seus controles, geradores de indução e sistemas de geração eólica a velocidade variável, além de modelos que possam representar um determinado regime de ventos e sua distribuição em uma usina.

A experiência conduzida neste trabalho procurou adequar os modelos desenvolvidos com aqueles existentes no ANATEM, buscando através de várias estratégias representar, mesmo que minimamente, o comportamento de um

sistema de geração de energia eólica. A estratégia utilizada buscou utilizar a modelagem de motores de indução (modelo de 3ª. ordem) para representar geradores de indução e modelo de carga mecânica para simulação de uma turbina eólica. Este procedimento, contudo, pode ser aprimorado por ações mais eficazes do próprio CEPEL na implementação rápida de modelos ou na retirada de pequenas restrições funcionais do programa.

A modelagem para carga mecânica existente no ANATEM é compatível com a simulação da característica de conjugado-velocidade de uma turbina eólica, contudo os testes de consistência do programa restringem as excursões dos valores de K_0 e K_2 em valores negativos, inviabilizando momentaneamente seu uso.

O MATLAB® [13] é um programa de alto desempenho para computação técnica, ele integra computação, visualização e programação, em um ambiente de fácil uso. O Simulink é um pacote que compõe o MATLAB para modelagem, simulação e análise dinâmica de sistemas. O MATLAB versão 6.5 possui um pacote de simulação de sistemas de potência, o Power System Blockset, que possui diversos modelos desenvolvidos para máquinas elétricas e conversores estáticos.

Neste trabalho foram desenvolvidos e simulados modelos representativos de usinas eólicas, em ambiente Simulink/MATLAB. Sua aplicação fica limitada a casos que podem ser representados por equivalentes com reduzido número de variáveis de estado.

O PSCAD [14] é um simulador de circuitos elétricos adequado para estudos de sistemas de potência. Neste projeto foram simulados alguns casos de conexão de sistemas eólicos, ilustrando a potencialidade deste aplicativo.

V. MODELOS MATEMÁTICOS

Os modelos matemáticos para representação do regime de ventos, da turbina eólica e do gerador elétrico utilizados neste trabalho são apresentados a seguir e discutidos à luz dos objetivos de análise.

A . Regime de ventos

A representação escolhida contempla modelos de quatro componentes de vento: vento constante, rajada de vento, rampa em vento e ruído aleatório de vento [15-16]. O vento pode então ser definido pela equação:

$$V_T = V_{Const} + V_R + V_{rajada} + V_{ruído} \quad (\text{em m/s}) \quad (2)$$

Estes componentes modelados permitem a análise de diversas situações transitórias e uma flexibilidade maior aos estudos necessários.

B . Turbina eólica

O conjugado produzido por uma turbina quando da incidência de vento sobre a mesma está intimamente ligado ao ângulo de passo (β) e a relação de velocidades (λ). O ângulo de passo mede o deslocamento angular entre o perfil

da pá e o plano de rotação, enquanto a relação de velocidades é medida pela razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade de vento incidente.

Na modelagem da turbina eólica, faz-se imprescindível o levantamento do coeficiente de conjugado da turbina em função dos parâmetros acima descritos. Vários modelos matemáticos têm sido utilizados para prever esta relação. Neste trabalho são apresentadas duas expressões para relacionar o coeficiente de conjugado em função do ângulo de passo e da relação de velocidades.

B1. Modelo polinomial [15]

O coeficiente de conjugado C_q pode ser representado por uma família de polinômios da forma:

$$C_q = \sum_{i=1}^{2n+1} b_{i-1}(\beta) \lambda^{\frac{i-1}{n}} \quad (3)$$

onde n é a ordem do modelo e não do polinômio.

B2. Modelos não polinomiais [17]

Diversos modelos não-polinomiais têm sido propostos na literatura. Para exemplificar esta diversidade de modelos são apresentadas as expressões utilizadas em [17], que foram utilizados para modelagem de uma turbina eólica de 1MW da Bônus Energy A/S:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (4)$$

$$C_q = \frac{C_p}{\lambda} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

De posse de uma expressão que represente o coeficiente de conjugado, o conjugado produzido pela turbina pode ser obtido por:

$$T_t = \frac{1}{2} \rho A R V^2 C_q(\lambda, \beta) \quad (7)$$

C. Gerador de indução

Um modelo detalhado de uma máquina de indução envolve normalmente cinco variáveis de estado que correspondem às dinâmicas de estator e de rotor (enlace de fluxos ou correntes) e da velocidade rotacional. Normalmente agregam-se a estas equações, duas equações diferenciais para representação das tensões nos capacitores para correção do fator de potência. Logo, um conjunto de sete equações diferenciais é necessário para representar cada unidade geradora e seu banco de capacitores local.

Em um sistema elétrico, com um número elevado de máquinas, o modelo detalhado de 7ª ordem torna-se inadequado, caso equações algébricas sejam utilizadas para representar a rede elétrica. Uma redução da ordem do modelo conduz a um menor esforço computacional e pode proporcionar soluções suficientemente precisas para as equações do regime transitório.

Para simulação de uma única turbina ou usina, incluindo os modos de alta frequência devido à elasticidade dos eixos e acoplamentos mecânicos e às dinâmicas das malhas de controle e atuação de conversores estáticos, o modelo de 5ª ordem ou 7ª ordem pode ser empregado. Contudo, para estimação de flutuações de tensão de uma usina eólica, onde o número de unidades geradoras é elevado e os modos de alta frequência podem ser desprezados, um modelo de mais baixa ordem produz resultados com precisão adequada.

Como é usual nos modelos para geradores síncronos utilizados em estudos de estabilidade, a dinâmica eletromagnética de estator é desprezada, assim, o modelo mais utilizado para representar máquinas de indução é aquele que representa as dinâmicas de fluxo magnético de rotor e as dinâmicas mecânicas, denominado de modelo de 3ª ordem e muito empregado na modelagem de motores de indução.

Para a simulação de uma usina completa, com n unidades geradoras em paralelo, pode-se utilizar o artifício de simular um gerador equivalente com a seguinte composição de parâmetros:

- Resistência de estator equivalente (R_{sn}) = R_s/n ;
- Reatância de dispersão de estator equivalente (X_{lsn}) = X_{ls}/n ;
- Reatância transitória equivalente (X'_n) = X'/n ;
- Constante de tempo rotórica equivalente (τ'_{on}) = τ'_o ;
- Constante de inércia equivalente (H_{an}) = $n \cdot H_a$

VI. ESTUDO DE CASO: USINA DE CAETITÉ

A. Usina de Caetité

Como estudo de caso foi escolhido o projeto da Usina Eólica de Caetité, de aproximadamente 60 MW em turbinas eólicas. Por falta de dados específicos de uma gama mais variada de turbinas eólicas, utilizou-se neste estudo dois modelos de turbinas eólicas: turbinas Bonus de 1 MW para os diversos estudos e turbinas Micon de 600 kW para os estudos de “flicker”.

O sistema elétrico considerado representa parte da rede da COELBA, e inclui as barras de Funil, Brumado e de Caetité, sendo esta última considerada o PCC da usina eólica, conforme ilustrado na Figura 1.

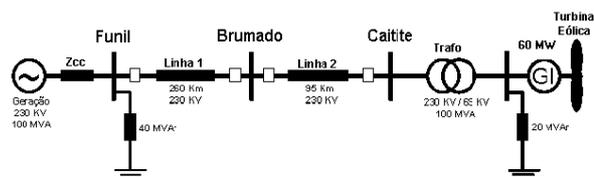


FIGURA 1 – Arranjo básico do sistema elétrico

B. Estudos de Variação de Tensão

Considerando 60 geradores de indução de 1 MW instalados em Caetité, foi estudado o desempenho da rede elétrica, em termos do perfil de tensão nas barras do sistema. O programa ANAREDE foi utilizado, sendo previa-

mente determinada a característica de potência ativa versus potência reativa da usina, pelo modelo em regime permanente do gerador de indução.

Foram consideradas as situações com e sem compensação local de reativos, para diversos níveis de geração eólica. A Figura 2 ilustra os perfis de tensão na barra de Caetité, indicando a conveniência de se operar o sistema sem compensação de reativos local, tendo em vista as características capacitivas das linhas de transmissão existentes.

C. Estudos de Flutuação de Tensão

O ponto de conexão ao sistema elétrico tem uma potência de curto-circuito de 188 MVA. Consideraram-se, para realização dos estudos de “flicker”, 100 turbinas Micon, controladas por stall com conexão direta de gerador de indução, e ventos médios de 8,5 m/s.

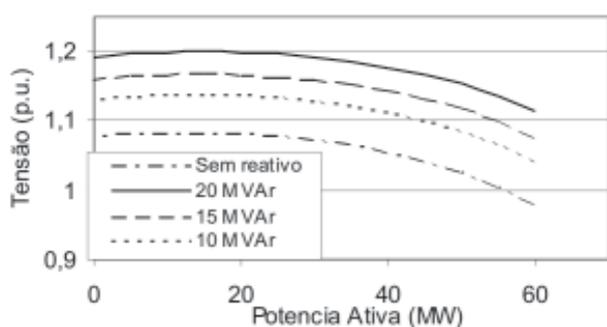


FIGURA 2 – Perfil de tensão em Caetité para diversos níveis de compensação local de reativos

Considerando estes dados e fazendo a interpolação dos coeficientes de flicker para o ângulo de impedância da rede ($\varphi_{cc}=81,76^\circ$), segundo procedimento estabelecido na norma IEC 61400-21, obtem-se para operação contínua: $P_{it} = 0,022$ e para 100 turbinas $P_{it} = 0,22$, que se encontra dentro dos limites máximos permitidos pela IEC61000-3-7 para redes de média tensão ($P_{it} < 0,25$). Em operação chaveada, os valores correspondentes são:

- Na velocidade de partida: $P_{it} = 0,13$ e $d = 0,2\%$;
 - Na velocidade nominal: $P_{it} = 0,086$ e $d = 0,5\%$.
- Todos os valores acima atendem às normas IEC.

D. Estudos Transitórios

Nesta seção serão apresentados alguns resultados obtidos com os diversos aplicativos utilizados, com o objetivo de ilustrar os procedimentos discutidos.

D.1 Caso 1 (ANATEM)

Neste caso, utilizando o ANATEM e modelando a usina eólica dividida em 6 grupos de 10 MW, aplicando o modelo de 3ª. ordem para motores de indução, é estudado o impacto de um curto circuito na barra de Brumado, com a proteção atuando após 120 ms. Os transitórios de tensão (Fig. 3) e de potência ativa em um grupo de turbinas (Fig. 4) ilustram o comportamento do sistema.

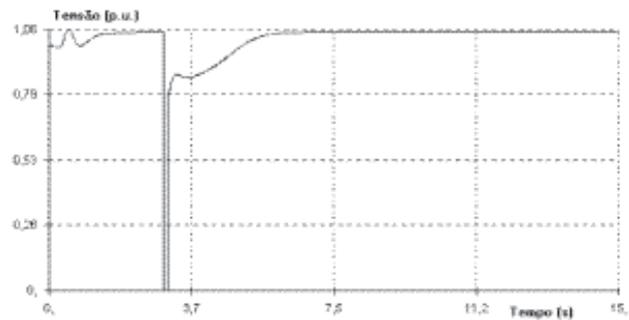


FIGURA 3 – Tensão (em p.u.) em Brumado no tempo (s)

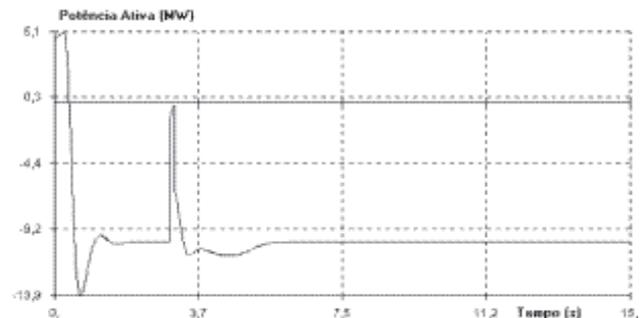


FIGURA 4 – Potência gerada (em GW) em um grupo de 10 turbinas Bonus

D.2 Caso 2 (Simulink/MATLAB)

O sistema de potência foi reduzido à impedância de curto-circuito na barra de Funil 230 kV. Foi utilizado um gerador de indução equivalente de 60 MW na barra de 69kV, com a turbina entrando em operação em $t=0,1$ s e o banco de capacitores de 13 MVar local conectado em $t=0,2$ s, sob condições de velocidade de vento de 12,1 m/s. A partir desta situação é avaliado o impacto de uma rampa descendente de velocidade de vento, com redução de 3m/s num intervalo de tempo de 0,5 s. A Fig. 5 ilustra a variação de vento e as dinâmicas de potências ativa e reativas geradas, de tensão na barra de Caetité e de velocidade da turbina equivalente.

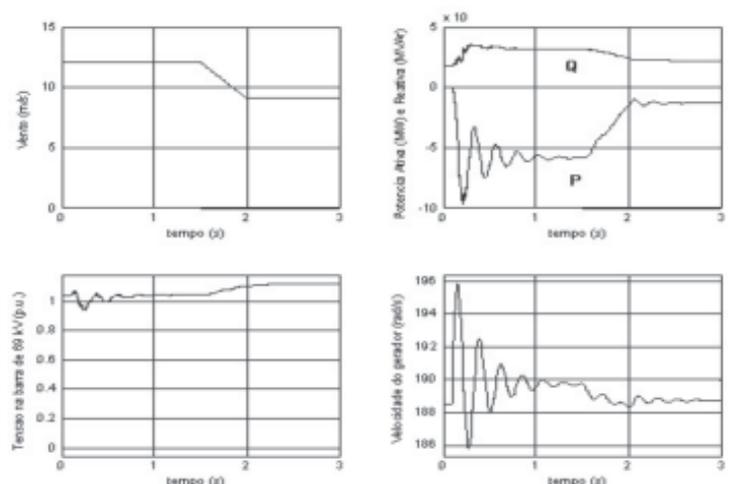


FIGURA 5 – Conexão da Usina em vento nominal e decréscimo do vento

D.3 Caso 3 (PSCAD)

As figuras 6 e 7 ilustram o uso do PSCAD na análise do comportamento do sistema frente a um afundamento de tensão. Para isto é simulada uma falta trifásica não-franca na barra de Brumado. Após a falta, a tensão na barra entra em colapso e não retorna mais ao seu valor inicial.

Destaca-se neste caso o comportamento instável da usina, que tende a aumentar sua velocidade em virtude da baixa tensão no barramento (figura 7).

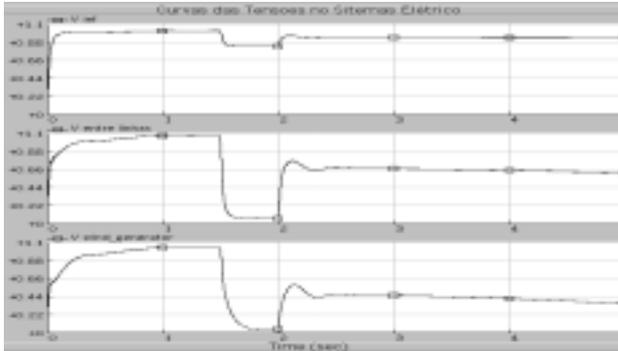


FIGURA 6 – Tensões nas diversas barras

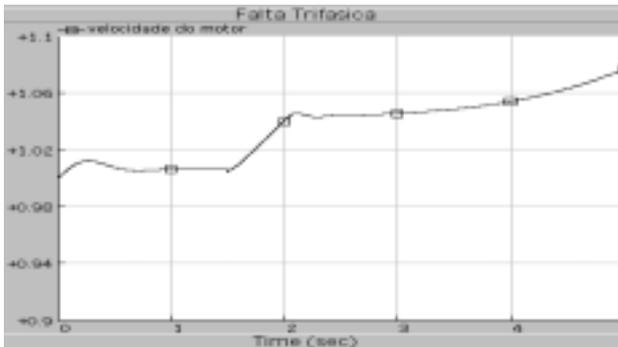


FIGURA 7 – Velocidade de uma unidade geradora

VII. CONCLUSÕES

Após a realização desses estudos pôde-se perceber claramente a influência da geração assíncrona no sistema elétrico, permitindo, assim, discutir os procedimentos de análise atualmente utilizados (modelos e ferramentas).

Neste sentido verificou-se, mesmo com uma abordagem mais ilustrativa dos procedimentos, que o dimensionamento adequado da compensação de reativos não deve ser conduzida apenas para garantia de um determinado fator de potência local, mas e determinantemente pelas características presentes na própria rede elétrica.

VIII. ESTUDOS FUTUROS

O uso de tecnologias mais modernas de turbinas eólicas, com o uso intensivo da eletrônica de potência em sistemas a velocidade variável, além do benefício de minimizar as operações de chaveamento e as flutuações dos fluxos de potência ativa e reativa, permite um controle em tempo real da potência reativa absorvida ou injetada no sistema de forma a garantir uma melhor regulação de tensão. A continuação dos estudos de conexão de usinas eólicas ao sistema elétrico deverá englobar esses tópicos.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DEWI, "Power quality measurement and wind turbine operational improvement at the CEMIG Morro do Camelinho wind farm", NR97 0808, Dec/1997.
- [2] Silva, S.R.; Medeiros, N.A., Cardoso Filho, B.J., Barbosa, A.L.B. & Costa, H.F., "Qualidade da energia elétrica gerada em usinas eólicas: uma avaliação", *Anais do III Sem. Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Brasília, Agosto/99, p. 422-427.
- [3] Junior, K.R.A., Medeiros, M.O. & Montezuma, F., "Monitoramento da qualidade da energia no ponto de acoplamento da fazenda eólica de Taiba", *Anais do III Sem. Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Brasília, Agosto/99, p. 195-200.
- [4] Jenkins, N., "Engineering wind farms", *Power Engineering Journal*, April/1993, p.53-60,
- [5] Boulaxis, N.G., Papathanassiou, S.A. and Papadopoulos, M.P., "Wind turbine effect on the voltage profile of distribution networks", *Renewable Energy*, 25, 2002, p.401-415.
- [6] Gerdes, G. and Santjer, F. "Power quality of wind turbines and their interaction with the grid", DEWI, 1996.
- [7] Saad-Saoud, Z. and Jenkins, N., "Models for predicting flicker induced by large wind turbines", *IEEE Trans. on Energy Conversion* Vol.14, No. 3, Sept/1999.
- [8] Feijóo, A. and Cidrás, J. "Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis", *IEEE Trans. on Power Systems* Vol.15, No. 1, Feb/2000, p.110-115.
- [9] DEWI, "Wind Turbine Grid Connection and Interaction", 2001.
- [10] IEC 61400-21, "Wind turbine generators systems - Part 21: Measurements and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines", IEC, Dec/2001.
- [11] CEPEL, Manual do Usuário – ANATEM, V09-12/01, 2001.
- [12] CEPEL, Manual do Usuário - ANAREDE, V07-08/99, 1999.
- [13] Matsumoto, E. Y. "MATLAB 6.5 – Fundamentos de Programação", Editora Erica, 1a. edição, 2002.
- [14] Woodford, D., *Introduction to PSCAD – V3*, 2001 by Manitoba HVDC Research Centre Inc.
- [15] Silva, S.R. *Sistema Eólico de Geração de Energia Elétrica*. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Eng. Elétrica da UFPb, 1988.
- [16] Anderson, P.M. & Bose, A., "Stability simulation of wind turbine systems", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 12, December/1983.
- [17] Sloopweg, J.G., Polinder, H. & Kling, W.L. "Initialization of Wind Turbine Models in Power Systems Dynamics Simulations", *IEEE Porto Power Tech Conference*, Portugal, Sept/2001.