



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GAT - 11  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO IV  
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**MODELO DE CONTROLE DE PÁS DE AEROGERADORES DE DUPLA ALIMENTAÇÃO PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA**

**Ney Guilherme Leal de Macêdo\*   Paulo César de Souza Câmara   Jurandir de Almeida Cavalcanti  
Eduardo Sodré**

**CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco**

**RESUMO**

Este informe técnico trata da modelagem e simulação de aerogeradores de velocidade variável com geradores de indução de dupla alimentação.

Seu foco está concentrado na modelagem do controle de pás desses aerogeradores para estudos dinâmicos em grandes redes de potência.

Apresenta breve descrição dos principais componentes e aspectos de interesse dos aerogeradores de dupla alimentação, descreve o modelo implantado no programa ANATEM pelo Cepel em colaboração com empresas do Grupo Eletrobrás (Chesf, Eletrosul e Furnas) e ONS, apresentando também resultado de simulações visando mostrar a influência do controle de pás dos aerogeradores de dupla alimentação no comportamento do sistema elétrico.

**PALAVRAS-CHAVE**

Geração Eólica, Controle, Gerador de Dupla Alimentação, DFIG, Controle de Pás.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Diversos fatores apontam para a necessidade da diversificação da matriz energética brasileira, assim como para o início do aproveitamento em larga escala das fontes alternativas de energia. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia, PROINFA, prevê a entrada em operação, até dezembro de 2006, de 3300 MW dessas fontes, sendo 1100 MW de energia eólica, 1100 MW de energia de biomassa e 1100 MW de pequenas centrais hidráulicas.

Na região Nordeste, deverá ser instalada geração eólica, através do PROINFA, em montante superior a 480 MW. Para um sistema com mais de 10.000 MW de potência instalada, isto representa, aparentemente, índice de penetração eólica ainda muito pequeno.

Esse quadro entretanto, poderia ter se modificado facilmente, ao longo do processo de decisão do Proinfa, em função de decisões tanto de governo quanto privadas.

Em alguns momentos, ao longo de 2004, chegou a se prever a instalação de 700 a 800 MW de geração eólica no Nordeste. Tomando esses números como base, e considerando que na carga leve, em época de importação de energia para a região Nordeste, a geração sincronizada local pode situar-se em patamar inferior aos 5000 MW, teríamos, no caso de ilhamento do sistema Nordeste nessa condição de carga, um significativo índice de penetração eólica, superior a 15%.

Esses números ilustram a possibilidade de serem alteradas as condições de operação do sistema elétrico da região, de forma significativa, em um intervalo de tempo bastante curto.

Independentemente das hipóteses acima, ao final de 2006 haverá diversos ramais de distribuição, com redes de distribuição relativamente frágeis com significativo índice de penetração eólica, o que reforça a necessidade de serem criados os instrumentos necessários para a avaliação do impacto dessa nova tecnologia de geração na operação do sistema eletro-energético da Região.

\*Rua Delmiro Gouveia, 333 – Sala 234 - CEP 50761-901 - Recife - PE - BRASIL  
Tel.: (081) 3229.3548 - Fax: (081) 3229.3350 - e-mail: neyleal@chesf.gov.br

Nesse sentido é que se justifica o esforço de modelagem de aerogeradores para estudos dinâmicos de grandes redes de energia elétrica atualmente sendo efetuado no País e, em especial, na região Nordeste.

Tendo em mente o atual estágio da tecnologia de geração eólica, o Cepel, com forte participação de Empresas do Grupo Eletrobrás (Chesf, Eletrosul e Furnas) e do ONS já desenvolveu modelos de aerogeradores de conexão direta, geradores de dupla alimentação e se empenha atualmente na modelagem de geradores eólicos síncronos para implementação no programa ANATEM, principal ferramenta de simulação dinâmica do setor elétrico brasileiro.

Como parte desse esforço, este artigo se concentra na análise da modelagem do controle de pás de aerogeradores de dupla alimentação visando o seu emprego em estudos dinâmicos de grandes redes elétricas de potência.

## 2.0 - O AEROGERADOR DE DUPLA ALIMENTAÇÃO

A figura 1 ilustra por um diagrama um gerador eólico de dupla alimentação (DFIG) destacando seus principais componentes.

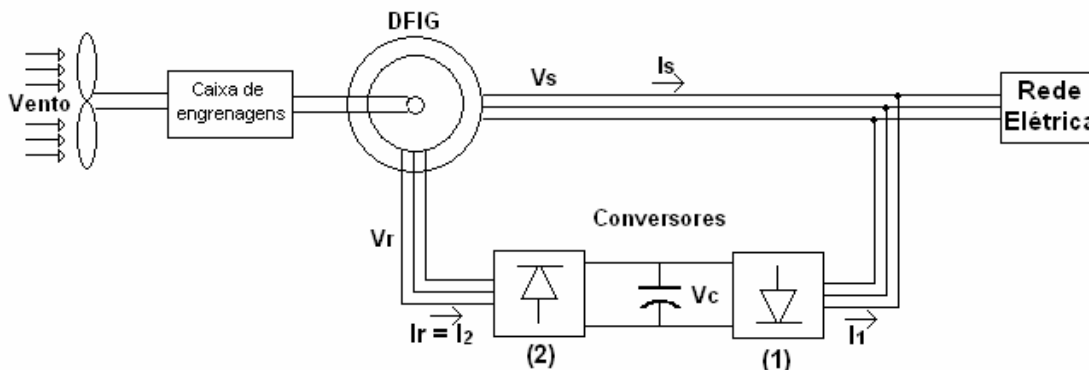


FIGURA 1 – Gerador eólico de dupla alimentação – Diagrama Esquemático

O conjunto das pás, conectadas ao eixo, é o componente de um gerador eólico que caracteriza a essência do processo de conversão em questão: transformação da energia cinética (eólica) em energia mecânica em condições de ser transformada pelo gerador em energia elétrica.

A caixa de engrenagens é utilizada para compatibilizar a baixa velocidade do rotor da turbina eólica à velocidade necessária para que o gerador se conecte a uma rede elétrica com 60 (50) Hz.

O gerador de indução é do tipo rotor enrolado, não diferindo qualitativamente de um gerador de indução comum.

Os conversores a ele associados é que se constituem no principal fator a caracterizar o conjunto como um equipamento de velocidade variável, capaz de fornecer potência à rede tanto pelo estator quanto pelo rotor.

Aerogeradores convencionais, diretamente conectados à rede, operam com uma velocidade constante, função da frequência da rede, do número de pólos do gerador elétrico e da relação de velocidades da caixa de engrenagem. Pelas razões apresentadas no item 3.1, os equipamentos de velocidade variável permitem melhor aproveitamento da energia do vento do que os aerogeradores que operam com velocidade constante.

A figura 2 ilustra a diferença de eficiência dos equipamentos de velocidade variável, com controle do ângulo das pás, em relação às máquinas de conexão direta (velocidade constante), comparando características “potência x velocidade do vento” típicas para ambas as classes de aerogeradores.

Verifica-se nessa figura que para a mesma velocidade do vento, as máquinas de velocidade variável produzem maior potência. Essa diferença implica em mais energia produzida, o que justifica o investimento em dispendiosos conversores eletrônicos.

Os conversores são usualmente dimensionados para que o rotor possa operar numa faixa de  $\pm 30\%$  em torno da velocidade nominal do aerogerador, o que é equivalente a produzir (ou consumir) cerca de 30% da potência nominal do estator, uma vez que a potência do rotor pode ser aproximada por

$$P_r = -s \cdot P_s \quad (1)$$

onde

$P_s$  e  $P_r$ : potências geradas pelo estator e pelo rotor, respectivamente ;

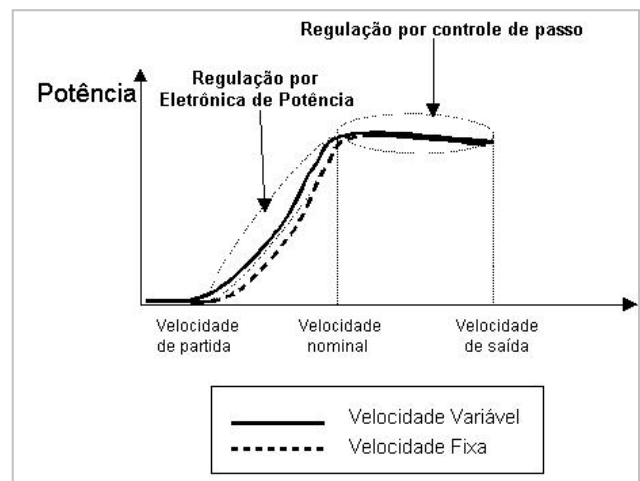


FIGURA 2 – Curvas Potência x Velocidade do Vento

$s$  : escorregamento do rotor, definido pela expressão

$$s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s ; \quad (2)$$

$\omega_s$  : frequência elétrica do estator;

$\omega_r$  : frequência mecânica do rotor.

O rotor, portanto, consome energia da rede quando sua velocidade é menor que a síncrona e, vice-versa. Desse modo, as máquinas de velocidade variável utilizam parte da energia cinética do rotor como um pulmão, o qual contribui para evitar que bruscas variações de vento se propaguem para a rede, assim como evitam elevados esforços mecânicos sobre o equipamento.

Esse controle de velocidade é realizado basicamente por duas malhas de controle: a primeira atuando sobre os conversores eletrônicos, os quais podem ser ajustados para controlar a potência ativa do aerogerador em período da ordem de décimo de segundo [1], a segunda, atuando sobre o ângulo das pás, cujas funções principais são, 1) evitar que a potência do aerogerador ultrapasse o seu valor nominal e 2) otimizar o aproveitamento da energia eólica pelo equipamento.

Os aerogeradores de dupla alimentação ainda contam com malhas de controle de potência reativa / tensão além de sistemas de proteção (tensões, correntes e frequências), diversos dos quais devem ser representados em estudos de estabilidade de grandes redes elétricas de energia, para que se tenha uma resposta realista da influência desses equipamentos no comportamento dinâmico do sistema. Esses dispositivos não serão tratados neste trabalho, o qual se focará na discussão da malha de controle do ângulo das pás de um aerogerador de dupla alimentação, comentando, como subsídio ao assunto principal algumas questões do controle de velocidade realizado através dos conversores.

### 3.0 - O MODELO UTILIZADO

A estrutura geral do modelo utilizado é apresentada na figura 3 a seguir, onde são indicados os principais componentes:

- turbina, correspondendo às equações que descrevem a conversão da energia cinética do vento em energia (potência) mecânica;
- gerador, incluídas as equações que descrevem tanto o comportamento elétrico do gerador de indução quanto as que determinam a rotação do conjunto girante do aerogerador;
- controles dos conversores, os quais atuam sobre as grandezas elétricas da máquina de dupla alimentação;
- o controle das pás da turbina.

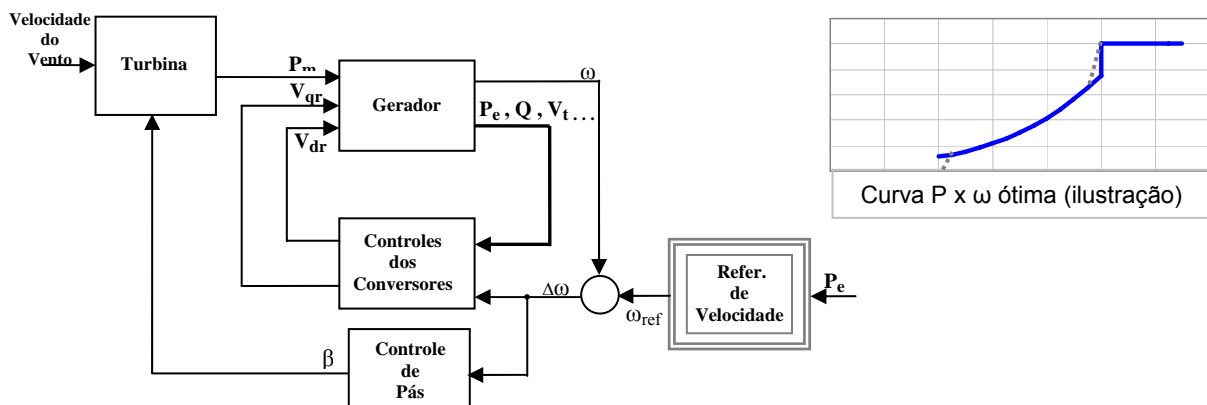


FIGURA 3 – Modelo do Gerador Eólico de dupla alimentação – Visão Geral

Na figura 3, ressalta-se a relação da potência elétrica do gerador com a referência de velocidade dos controles. Essa característica deve ser tal que leve o gerador eólico a operar na região de máxima eficiência da turbina.

#### 3.1 Modelo da Turbina

A expressão utilizada para calcular a energia mecânica fornecida no eixo da turbina é

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) A V^3 \quad (3)$$

Onde

$\rho$  – densidade do ar,

$C_p$  – coeficiente de performance da turbina,

$A$  – área coberta pelo rotor ( $\pi d^2 / 4$ , sendo  $d$  o diâmetro do rotor),

$V$  – velocidade do vento.

O coeficiente de performance da turbina depende de dois parâmetros:  $\lambda$  e  $\beta$ , sendo

$\beta$  - Ângulo das pás em relação ao plano de rotação do rotor e

$\lambda$  - relação adimensional da velocidade tangencial na ponta da pá pela velocidade do vento; tomando R como o raio e  $\omega$  a velocidade angular do rotor,  $\lambda$  é dada pela expressão

$$\lambda = \omega R / V \quad (4)$$

$C_p$  indica a parcela da energia do vento que é transformada em energia mecânica. Seu valor máximo teórico é 0,593, correspondente ao limite de Betz [5].

A forma usual de se representar  $C_p$  é ilustrada na figura 4, onde se mostra um gráfico de  $C_p \times \lambda$ , tendo  $\beta$  como parâmetro.

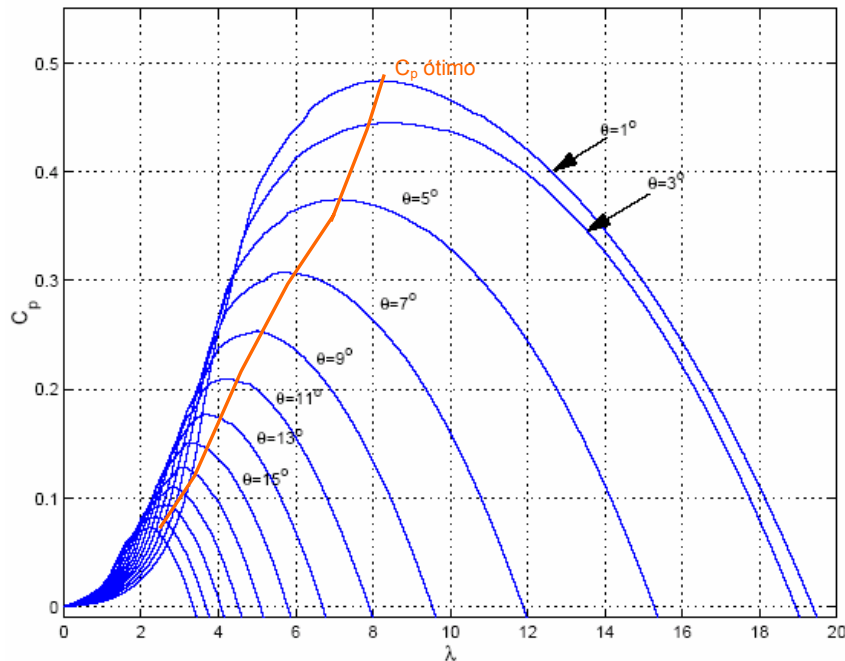


FIGURA 4 – Curva  $C_p \times \lambda$  para uma turbina [2]

A capacidade de operar próximo à curva  $C_p$  ótimo é a principal justificativa para construir geradores de velocidade variável, mais caros que os convencionais, de conexão direta, os quais operam com velocidade constante, atrelada à da rede.

Para representar essa característica no modelo, é necessário construir, a partir da curva  $C_p$  ótimo e das equações (3) e (4), uma característica  $P_m \times \omega$  ótima, a qual é utilizada para produzir a referência de velocidade mostrada na figura 3.

A parte tracejada da curva  $P_m \times \omega$  ótima é uma alteração introduzida nessa curva para evitar problemas numéricos na simulação devido às descontinuidades nos valores de P, correspondentes às velocidades mínima e máxima do rotor.

Para simular o aerogerador em um programa de estabilidade, deve-se dispor de dados, do tipo apresentado na figura 4, fornecidos por fabricantes.

Com esses dados, o problema na simulação é: definido para cada instante de tempo um ponto de operação ( $V$ ,  $\omega$ ,  $\beta$ ), calcular o valor de  $C_p$  e, conseqüentemente, da potência mecânica ( $P_m$ ), fornecida pela turbina naquele instante.

Três alternativas para a determinação do valor de  $C_p$  tem sido relatadas [2, 5,11]:

- Fornecer uma matriz de pontos, representando as curvas na figura 4 e efetuar uma interpolação para determinar  $C_p$ .

- Calcular  $C_p$  pela expressão algébrica a seguir [5]

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 + (c_2 / \lambda_i) - c_3 \beta - c_4 \beta^x - c_5 e^{C_6 / \lambda_i} \quad (5)$$

$$\text{Onde, } 1 / \lambda_i = 1 / (\lambda + c_7 \beta) - c_8 / (\beta^3 + 1) \quad (6)$$

- Calcular  $C_p$  utilizando uma Série de Polinômios:

$$C_p(\lambda, \beta) = \sum_i \sum_j \alpha_{ij} \beta^i \lambda^j \quad (7)$$

Foi relatada [2] boa aproximação para a região  $2 < \lambda < 13$ , utilizando-se polinômios de quarta ordem.

A grande vantagem dos dois últimos métodos é a facilidade de implementação da expressão no programa, caso seja obtido um único conjunto de parâmetros para determinar  $C_p(\lambda, \beta)$ , dispensando o fornecimento de grande quantidade de dados para cada modelo de turbina eólica. Por outro lado, o tratamento matemático dos dados para obter os parâmetros das funções, pode ser muito trabalhoso.

### 3.2 Modelo do Gerador

Maiores detalhes do modelo de gerador implantado no ANATEM podem ser encontrados em [6], artigo do Cepel neste Seminário. As expressões a seguir correspondem a modelo típico utilizado na literatura, qualitativamente semelhante ao implantado pelo Cepel, visando facilitar referência em outros itens deste trabalho.

#### 3.2.1 Grandezas Elétricas

Neste item são apresentadas as equações do modelo tipicamente utilizado para representar as grandezas elétricas da máquina de indução [3], [10].

As principais premissas utilizadas para o desenvolvimento desse modelo são:

- a convenção utilizada corresponde à de gerador (correntes e potências positivas fluem do gerador para a rede);
- os eixos de referência d e q giram na velocidade síncrona;
- o eixo q se encontra  $90^\circ$  adiantado em relação ao eixo d;
- os fluxos são ondas senoidais;
- o máximo do fluxo do estator coincide com o eixo d ( $\psi_s = \psi_{ds}$ ,  $\psi_{qs} = 0$ ,  $V_s = V_{qs}$  e  $V_{ds} = 0$ ).

As variáveis e parâmetros estão em pu da máquina e seus significados são indicados a seguir.

- as letras s, r, d, q em subscritos, designam, respectivamente, quantidades relativas ao estator, ao rotor, eixo d e ao eixo q do gerador;
- $V_{ds}$ ,  $V_{qs}$ ,  $V_{dr}$ ,  $V_{qr}$ : tensões nos eixos de quadratura e direto do rotor e estator;
- $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{dr}$ ,  $i_{qr}$ : correntes nos eixos de quadratura e direto do rotor e estator;
- $\psi_{qs}$ ,  $\psi_{ds}$ ,  $\psi_{qr}$ ,  $\psi_{dr}$ : fluxos enlaçando os enrolamentos dos eixos de quadratura e direto do rotor e estator
- $R_s$ ,  $R_r$ : resistências dos enrolamentos do rotor e do estator;
- $L_{ss}$ ,  $L_{rr}$ ,  $L_m$ : indutâncias próprias e mútua estator - rotor;
- $\omega_s$ : frequência elétrica do estator;
- $p$ : operador diferencial d/dt;

$$\begin{aligned} V_{ds} &= -R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} \\ V_{qs} &= -R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} \\ V_{dr} &= -R_r i_{dr} - s \omega_s \psi_{qr} + p \psi_{dr} \\ V_{qr} &= -R_r i_{qr} + s \omega_s \psi_{dr} + p \psi_{qr} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= -L_{ss} i_{ds} - L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= -L_{ss} i_{qs} - L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} &= -L_{rr} i_{dr} - L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} &= -L_{rr} i_{qr} - L_m i_{qs} \end{aligned} \quad (9)$$

$$T_e = \psi_{dr} i_{qr} - \psi_{qr} i_{dr} \quad (10)$$

#### 3.2.2 Cálculo da Velocidade do Rotor

O balanço dos torques elétrico e mecânico, aplicado às inércias das partes girantes do aerogerador, define a velocidade da turbina de acordo com a expressão

$$2 H d\omega / dt = T_m + T_e \quad (11)$$

onde

- H: constante de inércia do conjunto gerador - turbina;
- $\omega$ : velocidade angular mecânica, referida ao lado do gerador;
- t: tempo;
- $T_m$ : Torque mecânico;
- $T_e$ : Torque elétrico.

Uma representação mais completa para estudos de estabilidade em grandes redes, deve considerar a elasticidade do eixo que interliga a turbina ao gerador, representando separadamente as respectivas inércias [2, 7].

Isto se justifica pela presença de modos de oscilação entre turbina e gerador com frequências próximas a 2 Hz, os quais, em caso de curto circuito, são excitados simultaneamente em todos os aerogeradores.

Saliente-se, entretanto, que neste trabalho as simulações ainda foram realizadas considerando a inércia do rotor concentrada em apenas uma massa.

### 3.3 Controles dos Conversores

Os controladores dos conversores utilizam estratégia de controle vetorial a qual permite o desacoplamento da malha de controle de velocidade daquela de potência reativa (ou tensão / fator de potência).

Nesse sentido, é possível mostrar [3, 9], a partir das expressões (8), (9), (10) e premissa (e) que o torque elétrico do gerador pode ser calculado, aproximadamente, pela equação (12) a seguir.

$$T_e = (L_m / L_{ss}) V_{qs} \cdot i_{qr} \quad (12)$$

Essa expressão indica a dependência do torque elétrico com a componente em quadratura da corrente do rotor.

No modelo de controlador adotado pelo Cepel, ilustrado na figura 5,  $i_{qr}$  é controlada por um PI atuando sobre o conversor do lado do rotor, constituindo a malha mais interna do controle de velocidade.

Ressalta-se ainda que a referência de velocidade é definida pela curva  $P \times \omega$  ótima, a qual indica para o controlador, a velocidade que permite maximizar a captação de energia pelas pás da turbina, de acordo com o exposto no item 3.1.

### 3.4 Controle das Pás

Essa malha de controle, embora menos rápida, interfere na dinâmica da geração de potência ativa, possuindo uma velocidade de atuação que indica a necessidade de sua inclusão nos estudos de estabilidade, conforme é a prática apresentada na bibliografia [2, 3, 4] e de acordo com alguns resultados escolhidos para relato no presente artigo.

Na figura 6 apresenta-se um diagrama de blocos, através do qual observam-se três ações básicas desse controle:

- permanente correção da velocidade baseada na saída do bloco de referência de velocidade,
- atuação para elevar  $\beta$  quando a potência elétrica supera a potência nominal do aerogerador e
- atuação para reduzir  $\beta$  quando a potência elétrica é inferior à nominal, permitindo operar  $\omega$  um valor de  $C_p$  mais elevado para elevar a eficiência do aerogerador.

Apesar de várias tentativas de junto a fabricantes de aerogeradores eólicos ainda há necessidade de esclarecimento em relação à formação do sinal de referência de velocidade. Em [2], por exemplo, há uma afirmação (página 4.11) de que “a referência de velocidade segue lentamente as alterações da potência com uma constante de tempo de aproximadamente 5 segundos”. Isso, entretanto não é explicitado em diagramas de blocos ou sob outras formas. Em função desse fato efetuamos simulações introduzindo uma constante de tempo de 5 segundos entre o sinal de potência elétrica e a curva  $P \times \omega$  do bloco referência de velocidade.

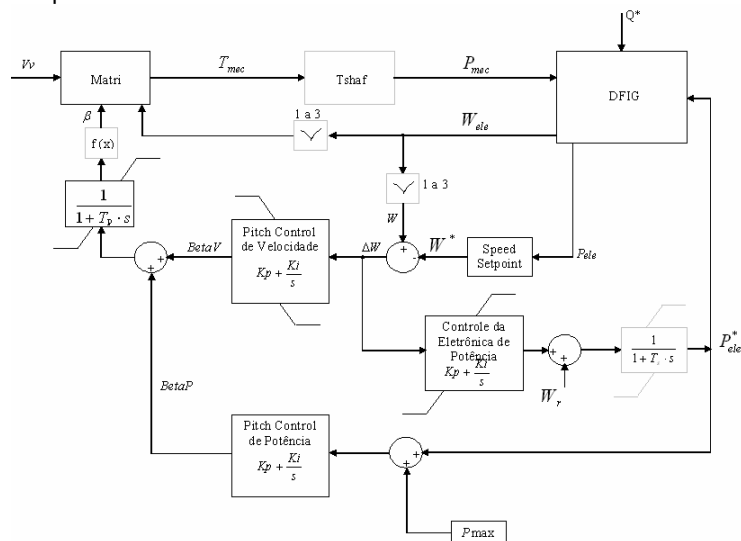


FIGURA 6 – Controle de Pás do Aerogerador

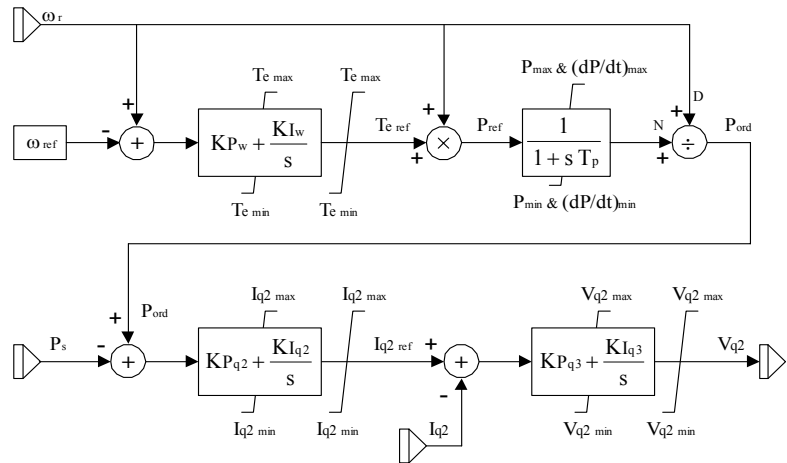


FIGURA 5 – Controle de Velocidade através dos conversores

## 4.0 - SIMULAÇÕES

Considerando a rede da figura 7 aplicou-se falta na barra infinita, por 100 ms, na qual a tensão foi mantida em 0,3 pu. Os resultados são apresentados nas figuras 8 a 10.

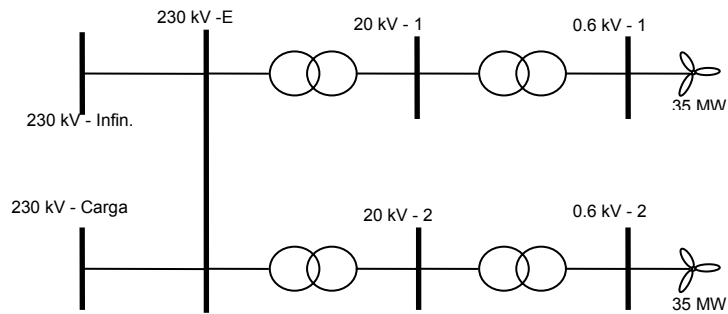


FIGURA 7 – Rede Utilizada para Simulação

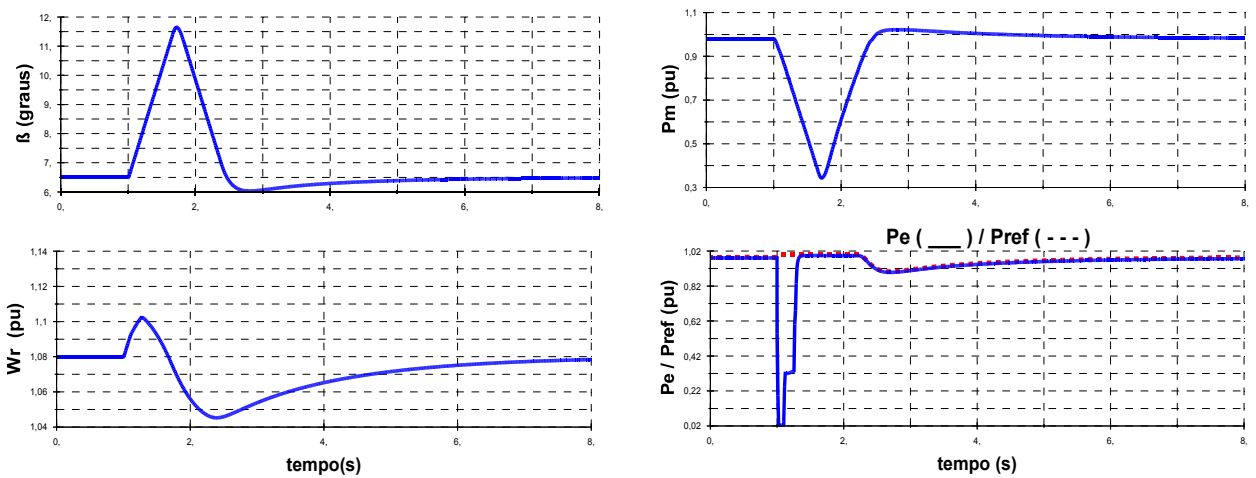


FIGURA 8 – Curto-circuito de 100 ms – Caso Base

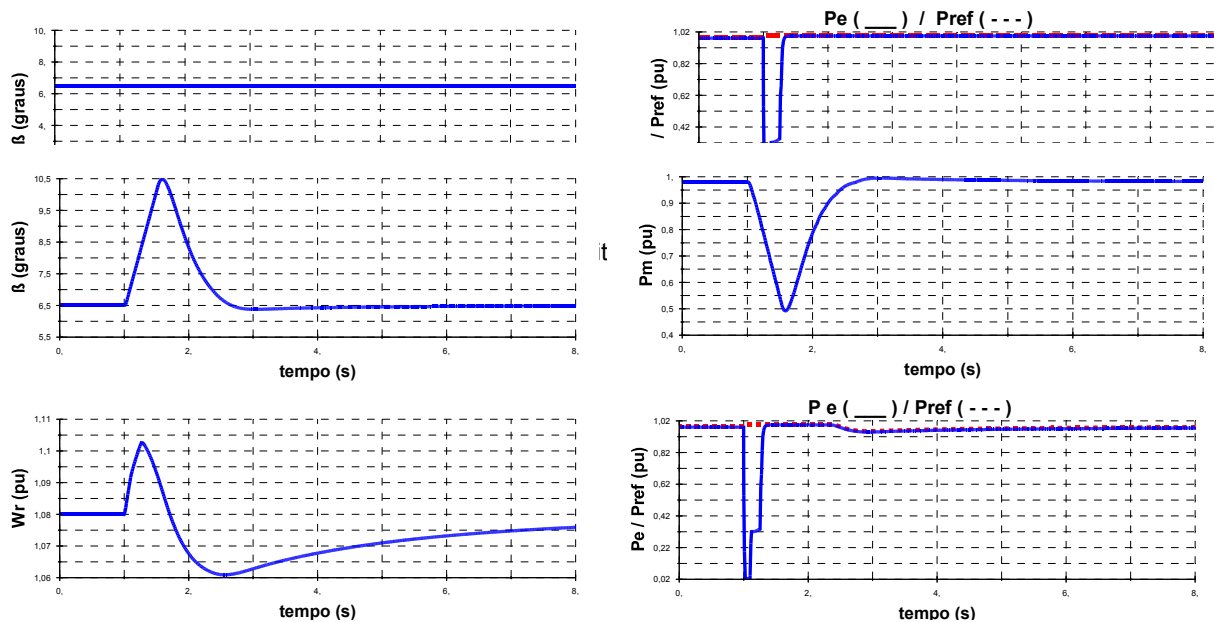


FIGURA 10 – Curto-circuito de 100 ms – com retardo de 5 s na referência de velocidade

Observando as figuras 8 e 10, verifica-se uma excursão do ângulo das pás da ordem de quatro a cinco graus em menos de um segundo. Pela figura 4, curvas  $C_p \times \lambda$ , verifica-se que só o valor de  $\beta$ , dependendo dos pontos de operação inicial e final, pode fazer a potência mecânica no eixo da turbina reduzir-se à metade nesse intervalo de

tempo. Considerando que existe ainda uma interação dinâmica onde  $\omega$  varia, é fácil entender a redução da potência mecânica em cerca de 50 a 60% nesse mesmo intervalo de tempo.

Observa-se ainda, nessas figuras, que as variações da potência ativa podem ser classificadas em rápidas, poucos décimos de segundo, e lentas, da ordem de segundos. É possível intuir que as variações rápidas são essencialmente definidas pelo controle eletrônico dos conversores e as lentas, pelo controle de pás.

Para verificar essa hipótese, simulou-se o mesmo distúrbio bloqueando-se no modelo, a atuação de  $\beta$ . O resultado é apresentado na figura 9, onde se verifica que a oscilação lenta da potência ativa desapareceu, ficando praticamente inalteradas as variações rápidas, o que corrobora a hipótese inicial.

O que diferencia a simulação da figura 10 daquela da figura 8 é a existência de um retardo de 5 segundos entre o sinal de potência elétrica e o bloco que produz a referência de velocidade. Essa alteração foi introduzida em função da afirmação “a referência de velocidade segue lentamente as variações na potência com uma constante de tempo de aproximadamente 5 segundos” [2, pág. 4.11].

De fato essa alteração provocou uma redução nas excursões de ângulo, potência mecânica, velocidade e potência elétrica (variações lentas), denotando a importância de informações de fabricantes para uma correta modelagem de aerogeradores.

Em relação às figuras acima ressalta-se que:

- O conjunto das variáveis tem um comportamento similar ao que se encontrou na literatura [2].
- A velocidade de atuação do controle de pás é suficientemente rápida para interferir na dinâmica do sistema elétrico.
- Informações de fabricantes são fundamentais para se prosseguir na evolução dos modelos de aerogeradores para estudos dinâmicos de sistemas elétricos.

## 5.0 - CONCLUSÃO

A controle das pás dos aerogeradores de dupla alimentação influencia o comportamento dinâmico da rede elétrica à qual o mesmo se interliga, devendo ser representado nos estudos dinâmicos de sistemas de potência.

O desenvolvimento adequado desses modelos dependerá, cada vez mais, de interação com fabricantes para a obtenção das informações mais realistas possíveis.

Como, em geral, o fornecimento de informações pelos fabricantes tem sido um processo difícil, em âmbito mundial, é necessário que as empresas que instalem centrais eólicas, estejam atentas na elaboração de seus contratos de compra de equipamentos para a solicitação dessas informações.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arantxa Tapia e outros; IEEE, Modelling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator; Transactions on Energy Conversion, vol 18, Nº 2, jun/2003.
- [2] GE POWER SYSTEMS. Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators – Version 3.0. October 2003.
- [3] Sloopweg e outros; Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator, IEEE 2001
- [4] LOPES, J. A. P. e de ALMEIDA, R. G. Documentação do Programa de Simulação Dinâmica de Sistema de Potência com Geradores de Indução Duplamente Alimentados e Geradores Convencionais com Controle de Pitch – VERSÃO 2.0 (Trabalho elaborado para o Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro), 11 de julho de 2004.
- [5] Heier, S.; Grid integration of Wind Energy Conversion Systems; John Wiley & Sons, 1998.
- [6] Rangel, R. D. ; Modelagem de Geração Eólica em Programas de Análise de Estabilidade Eletromecânica e de Fluxo de Potência; XVIII SNPTEE, out/2005
- [7] Markus A. Pöller, Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms; IEEE Bologna Power Tech Conference, jun/2003
- [8] Sodré, E.; Uma Comparação entre Modelos da Máquina DFIG para Geração Eólica; XVIII SNPTEE, out/2005
- [9] M. Machmoum e outros; Dynamic Performances of a Doubly-Fed Induction Machine for a Variable-Speed Wind Energy Generation; IEEE 2002
- [10] P. Kundur, Power System Stability and Control; EPRI, McGraw-Hill 1994
- [11] GAMESA; Modeling of DFIG - Presentation to ONS – Brasil; mar/2004