



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 16 7539

Tópico: Qualidade da Energia em Sistemas com Geração Distribuída

## ANÁLISE DO IMPACTO NA QUALIDADE DE ENERGIA DA CONEXÃO DE UNIDADES DE GERAÇÃO EÓLICA A SISTEMAS DE POTÊNCIA

WELLINGTON SANTOS MOTA<sup>1</sup>

LUCIANO SALES BARROS

UFCG

### RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida para análise dinâmica de geradores eólicos conectados a sistemas de potência. A metodologia consiste do modelo mecânico de turbinas eólicas, modelos de geradores e estratégias de controle. Dois tipos de geradores são considerados: gerador de indução com rotor em gaiola (SCIG) e gerador de indução duplamente alimentado (DFIG). Foi modelado o Parque Eólico de Poção conectado ao sistema CHESF-Leste. Através dos resultados obtidos pode-se avaliar a qualidade do fornecimento de energia do parque eólico durante ocorrências no sistema e variações na velocidade do vento.

### PALAVRAS-CHAVE

Energia eólica, simulação dinâmica, qualidade de energia elétrica.

### 1.0 INTRODUÇÃO

Devido a fatores como a desregulamentação do setor elétrico, questões ambientais (Protocolo de Kyoto), avanços na tecnologia de geradores de pequeno porte e baixo custo de investimento, há

alguns anos, em muitos países, teve início uma política de incentivo à geração de energia elétrica através de fontes alternativas.

No Brasil, após a implantação do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes alternativas de Energia Elétrica), o Ministério das Minas e Energia estima que a participação das fontes alternativas chegue a 5,9% da matriz energética brasileira.

Uma das formas de geração alternativa com potencial possibilidade de aproveitamento é a de energia eólica, tanto pela facilidade de acesso à sua fonte primária, o vento, como pela quantidade disponível da mesma. A potência eólica total instalada no mundo cresceu de 2,5 GW, em 1992, para 40 GW em 2004. A indústria estima 75 GW para 2010, o que é equivalente a 167 TWh por ano.

No entanto, devido à natureza aleatória da velocidade do vento e à utilização de máquinas assíncronas, os geradores eólicos produzem uma potência elétrica variável e não despachável e demandam potência reativa da rede, o que compromete a capacidade de controle de tensão. Desta forma, inicialmente estes geradores foram projetados para ser desconectados da rede quando da ocorrência de quedas de tensão devido a distúrbios no sistema, ou grandes variações na velocidade do vento.

<sup>1</sup> Grupo de Sistemas Elétricos, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande – Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande, PB, Brasil, +55-83-310-1267

Tais características são indesejáveis dentro do paradigma de qualidade de energia, fazendo-se necessário o estudo destas questões que surgem com a inserção de geradores eólicos em sistemas de potência.

Este trabalho visa a análise do impacto na qualidade do fornecimento de energia elétrica da conexão de geradores eólicos a sistemas de potência, através de uma metodologia proposta. A metodologia consiste do modelo mecânico de turbinas eólicas, dos modelos de geradores e estratégias de controle das máquinas.

A metodologia foi aplicada ao Parque Eólico de Poção conectado ao sistema CHESF-Leste através do programa de estabilidade transitória, ESTABEOLICA<sup>®</sup>, desenvolvido neste trabalho. Dois tipos de geradores são considerados: SCIG e DFIG.

Através dos resultados obtidos pode-se avaliar o impacto da ocorrência de faltas no sistema sobre os níveis de tensão dos geradores, e de variações na velocidade do vento sobre a potência produzida.

## 2.0 MODELO MECÂNICO

A potência mecânica  $P_m$ , de uma turbina eólica, é obtida a partir da equação aerodinâmica, [1].

$$P_m = \frac{\rho}{2} \pi R^2 c_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (1)$$

em que:

$\rho$  é a densidade do ar;

$R$  é o comprimento das pás da hélice;

$c_p$  é o coeficiente de potência da turbina eólica,

função de  $\lambda$  e  $\beta$  de acordo com (2), [2].

$$c_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

em que  $\lambda_i$  é definido por:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

e  $\lambda$  é a razão entre a velocidade linear das pontas das pás da hélice e a velocidade do vento, sendo definida por:

$$\lambda = \frac{\omega_r}{v_w} R \quad (4)$$

em que  $\omega_r$  é a velocidade angular da máquina;

$\beta$  é o ângulo de passo das pás, e

$v_w$  é a velocidade do vento.

A partir de (2), chega-se a curvas  $c_p \times \lambda$  para diferentes valores de  $\beta$ , Figura 1.

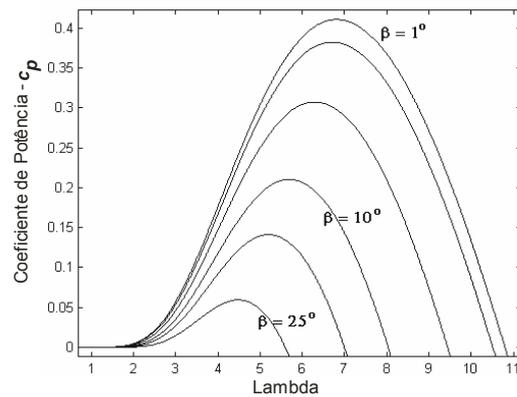


Figura 1 – Coeficiente de potência como função de  $\lambda$ .

## 3 MODELOS DE MÁQUINAS

### 3.1 Circuito equivalente da armadura para estudos de simulação

#### 3.1.1 Simulação do gerador de indução com rotor em gaiola (SCIG) ligado à rede de transmissão

O SCIG pode ser representado pelo circuito equivalente referido ao estator, como mostrado na Figura 2. Para conexão à rede através da tensão terminal, o modelo usado é representado por uma tensão interna atrás de uma impedância transitória.

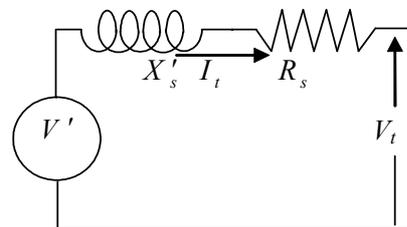


Figura 2 – Circuito equivalente do gerador de indução com rotor em gaiola.

Em que,

$$V_t = v_{ds} + jv_{qs} \quad (5)$$

é a tensão terminal do gerador;

$$I_t = i_{ds} + ji_{qs} \quad (6)$$

é a corrente de armadura, e

$$V' = v'_d + jv'_q \quad (7)$$

é a tensão interna do gerador.

Sendo,

$R_s$  a resistência de armadura, e

$$X'_s = \omega_s \left( L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) \quad (8)$$

a reatância transitória do gerador de indução.

As variações da tensão interna do SCIG são calculadas através de (9) e (10), [3].

$$\dot{V}'_d = -\frac{1}{T'_o} [V'_d - (X_s - X'_s)i_{qs}] + s\omega_s V'_q \quad (9)$$

$$\dot{V}'_q = -\frac{1}{T'_o} [V'_q + (X_s - X'_s)i_{ds}] - s\omega_s V'_d \quad (10)$$

em que,

$$T'_o = \frac{L_{rr}}{R_r} \quad (11)$$

é a constante de tempo transitória de circuito aberto, e

$$X_s = \omega_s L_{ss} \quad (12)$$

é a reatância de dispersão do estator.

### 3.1.2 Simulação do gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) ligado à rede de transmissão

Para este tipo de gerador a máquina pode ser representada pelo circuito equivalente mostrado na Figura 3, referido ao estator, para conexão à rede através da tensão terminal.

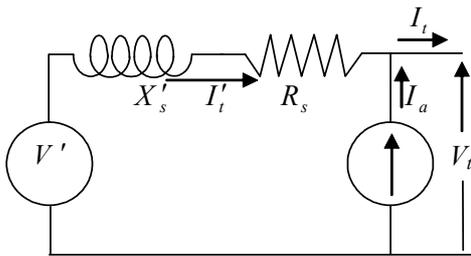


Figura 3 – Circuito equivalente do gerador de indução duplamente alimentado.

A fonte de corrente  $I_a$  representa a corrente através do conversor PWM C2, Figura 4. O cálculo de  $I_a$  é feito a partir da definição das potências ativa e reativa entregues à rede através de C2, [4].

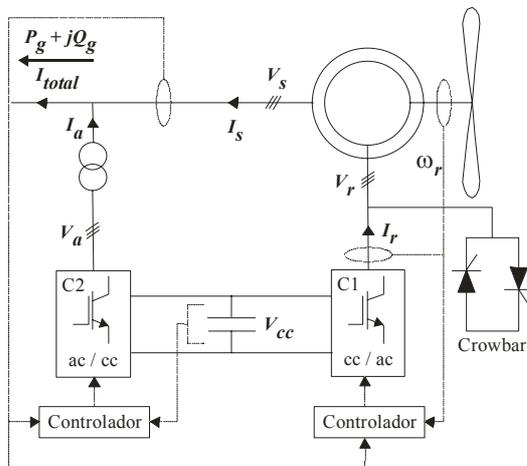


Figura 4 – Sistema de geração tipo DFIG.

As variações da tensão interna do DFIG são calculadas através de (13) e (14), [5].

$$\dot{V}'_d = -\frac{1}{T'_o} [V'_d - (X_s - X'_s)i_{qs}] + s\omega_s V'_q - \omega_s E_{FQ} \quad (13)$$

$$\dot{V}'_q = -\frac{1}{T'_o} [V'_q + (X_s - X'_s)i_{ds}] - s\omega_s V'_d + \omega_s E_{FD} \quad (14)$$

em que  $E_{FD}$  e  $E_{FQ}$  são as componentes da tensão  $V_r$ , aplicadas no rotor, oriundas do conversor PWM C1, referidas ao circuito do estator, como mostrado na Figura 4

## 4 SISTEMAS DE CONTROLE

### 4.1 Controle do ângulo de passo

O ângulo de passo  $\beta$  é controlado quando ocorrem variações na velocidade do vento, de modo que a potência de saída se mantenha dentro dos limites da máquina. A variável realimentada, potência mecânica, é calculada a partir da medição da velocidade do vento, através de uma unidade de controle de potência. O diagrama de blocos do controle do ângulo de passo é mostrado na Figura 5.

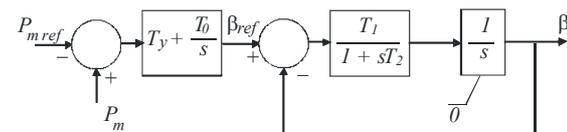


Figura 5 – Controle do ângulo de passo das pás da hélice.

### 4.2 Controles da máquina DFIG

#### 4.2.1 Controlador do conversor C1

Para definir a estratégia de controle para o conversor C1, assume-se que o eixo  $d$  da referência  $dq$  está alinhado com o fluxo estatórico. A decomposição de  $V_r$  em variáveis  $dq$  permite o controle desacoplado de potência e tensão, [6], Figura 6. Através de  $E_{FQ}$  pode-se controlar a velocidade da máquina e portanto, a potência mecânica da turbina. Simultaneamente, a tensão terminal do gerador pode ser controlada através de  $E_{FD}$ . Os ganhos dos controladores foram ajustados por tentativa e erro.

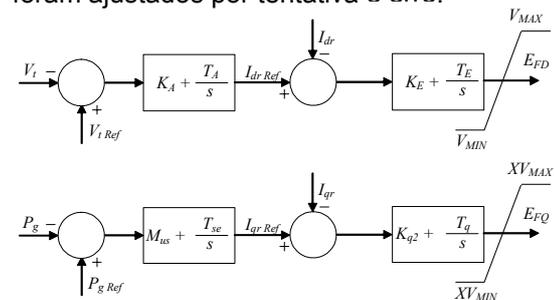


Figura 6 – Controles do conversor C1.

#### 4.2.2 Controlador do conversor C2

A corrente  $I_a$  é forçada pela ação do conversor C2 de acordo com o sinal do controlador. A estratégia de controle é baseada na teoria da potência instantânea, [7]. A potência reativa é definida de acordo com o fator de potência desejado e a potência ativa é definida pela tensão  $V_{cc}$ . A tensão  $V_{cc}$  é obtida através de um controlador PI a partir do cálculo do erro entre a potência real instantânea e a potência do rotor, Figura 7. Este valor medido de  $V_{cc}$  é então comparado à referência. Uma vez atingido o valor da tensão de referência, obtém-se a potência real instantânea que deve ser igual à potência ativa do rotor, [5].

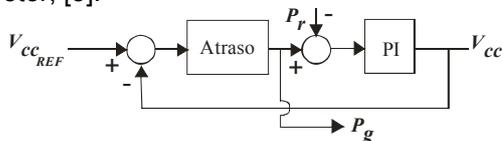


Figura 7 – Controle da tensão  $V_{cc}$ .

Foram realizadas simulações onde se representou o Parque Eólico de Poção de 38,4 MW, conectado ao Sistema Regional de Tacaimbó, pertencente ao Sistema CHESF-Leste.

Para realizar as simulações em regime permanente (Fluxo de Carga) utilizou-se o programa ANAREDE<sup>®</sup>. As simulações dinâmicas foram realizadas através do programa ESTABEOLICA<sup>®</sup>, [8]. Foram considerados os dados do sistema nacional interligado, disponibilizados pelo ONS (*Operador Nacional do Sistema*). A partir destes, foi elaborado um sistema regional simplificado equivalente, mostrado na Figura 8.

As gerações do Sistema CHESF foram representadas por modelos clássicos, apenas o Parque Eólico de Poção foi simulado com modelagem detalhada.

## 5.0 SIMULAÇÕES

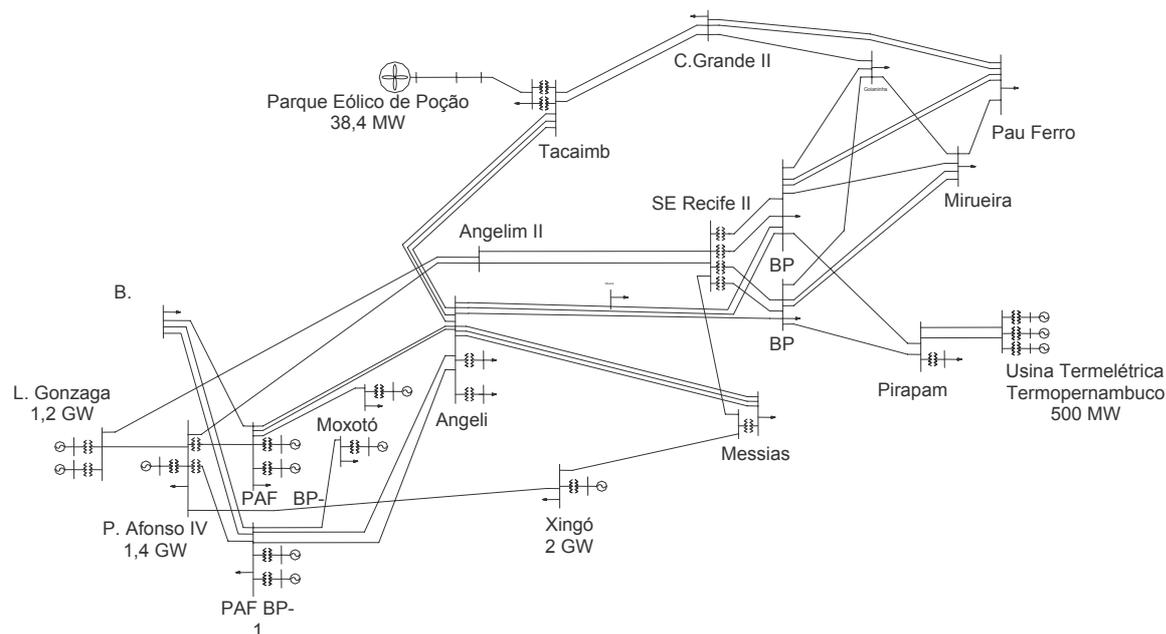


Figura 8 – Parque Eólico de Poção conectado ao sistema CHESF.

### 5.1 Simulação de um curto-circuito trifásico para a terra

A primeira simulação mostrada é a de um curto trifásico franco para a terra, na barra Tacaimbó, com duração de 150 ms. Na Figura 9 é mostrada a curva da tensão terminal do gerador para o parque eólico equipado com o SCIG. Nesta

simulação, pode-se ver uma queda de tensão após a ocorrência do evento.

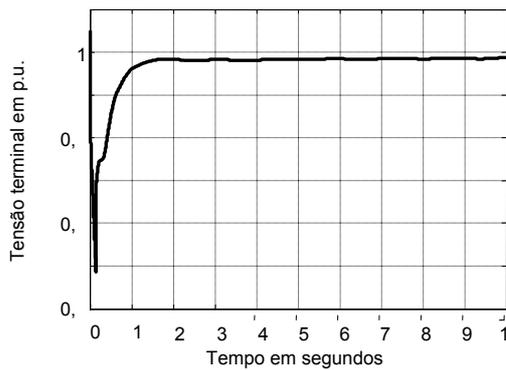


Figura 9 – Tensão terminal para o SCIG.

Na Figura 10 é mostrada a tensão terminal do gerador para o parque eólico equipado com o DFIG. O DFIG oferece a possibilidade de controle de tensão, permitindo o restabelecimento de sua tensão terminal. Esta capacidade permite que este tipo de gerador permaneça conectado ao sistema durante e após distúrbios. No entanto, durante distúrbios, a corrente  $I_r$  do rotor pode atingir valores acima da capacidade dos conversores C1 e C2.

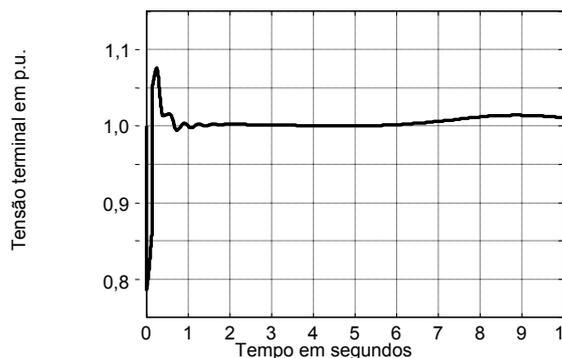


Figura 10 – Tensão terminal para o DFIG.

Um valor típico de limite de corrente dos conversores é 0,4 p.u. Para esta simulação, a corrente do rotor atinge um valor muito alto devido à severidade do distúrbio, Figura 11. Quando isto ocorre, o crowbar, circuito de proteção ligado ao rotor da máquina, Figura 4, é curto-circuitado para retirar os conversores de operação, e a máquina passa a funcionar como um SCIG.

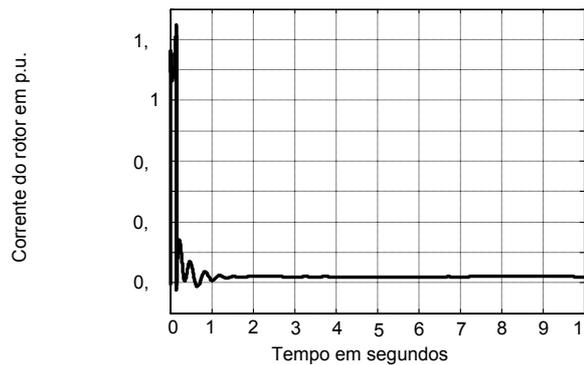


Figura 11 – Corrente rotórica do DFIG.

Uma outra condição para que o DFIG seja mantido em operação durante distúrbios, é que a tensão terminal seja mantida dentro da faixa  $0,7 < V_t < 1,15$  p.u.

Através das curvas nas figuras 10 e 11, percebe-se que os controles do DFIG necessitam de um sinal adicional para limitar a corrente do rotor.

### 5.1 Simulação de altas velocidades do vento

Quando a velocidade do vento está acima da velocidade média para qual a turbina eólica foi projetada, a potência produzida pela turbina pode estar acima do limite de operação segura da máquina e a tensão terminal do gerador apresenta pequenas oscilações devido ao desbalanço de potência. Na Figura 12 é mostrada a potência para um aumento de 8% da velocidade local do vento, no instante zero, e com a turbina eólica desprovida do controle do ângulo de passo. Nestas condições, o Parque Eólico de Poção passa a fornecer aproximadamente 48 MW de potência, e se encontra em seu limite mecânico.

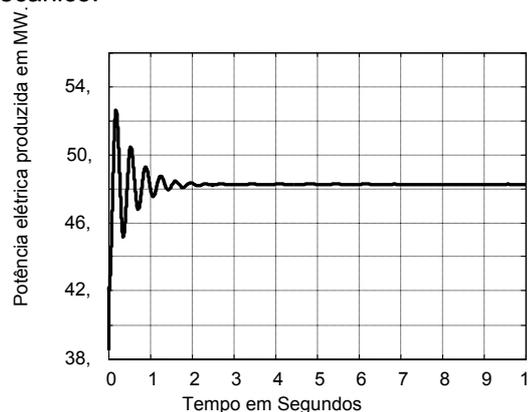


Figura 12 – Potência elétrica do DFIG.

Quando o DFIG está equipado com o controle do ângulo de passo, a potência nominal da turbina pode ser mantida e o conversor C1 força o amortecimento de oscilações na tensão terminal. Na Figura 13, é mostrada a potência produzida

para um aumento de 20% da velocidade do vento. Aqui o controle força o aumento do ângulo de passo para não utilizar o excesso de vento.

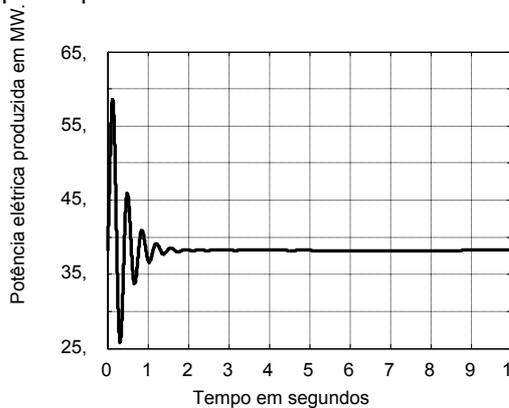


Figura 13 – Potência elétrica do DFIG equipado com o controle do ângulo de passo.

## 5.2 Simulação de baixas velocidades do vento

Foram realizadas simulações para velocidades do vento abaixo da média de velocidades para a qual o parque eólico foi projetado. Nestes casos, a potência produzida pelo parque é menor do que a sua potência nominal e a tensão terminal do gerador apresenta comportamento equivalente ao caso para altas velocidades do vento. A potência de saída para uma diminuição de 13% na velocidade do vento é mostrada na Figura 14. Aqui, o DFIG não está equipado com o controle do ângulo de passo.

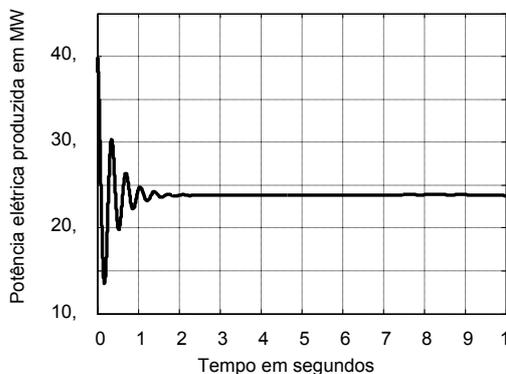


Figura 14 – Potência elétrica do DFIG.

Se o DFIG é equipado com o controle do ângulo de passo, a potência nominal da turbina pode ser mantida para velocidades do vento abaixo da média para a qual a turbina eólica foi projetada. Isto é feito diminuindo-se o ângulo de passo para melhor aproveitar a massa de vento que incide na hélice da turbina. Na Figura 15, mostra-se a potência elétrica do Parque Eólico de Poção para uma diminuição de 13% da velocidade do vento. Esta é a máxima diminuição da velocidade do vento para a qual o controle pode manter a potência nominal do parque.

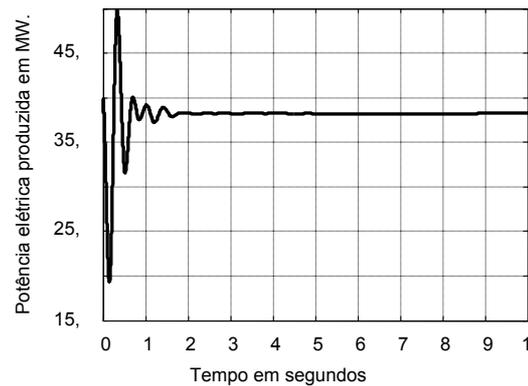


Figura 15 - Potência elétrica do DFIG equipado com o controle do ângulo de passo.

## 6.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia desenvolvida para a simulação dinâmica da conexão de geradores eólicos a sistemas de potência. A metodologia consiste da modelagem mecânica de turbinas eólicas, modelagem de geradores e estratégias de controle. Dois tipos de geradores foram considerados: SCIG e DFIG.

Através dos resultados obtidos para a simulação de faltas no sistema, pode-se observar que o DFIG tem a capacidade de manter a tensão nominal em seus terminais devido à possibilidade de controle. Esta característica é desejável do ponto de vista de qualidade de energia, pois permite a continuidade da operação deste tipo de gerador. No entanto, pode-se observar também a necessidade de um sinal de controle adicional para limitação da corrente do rotor, de modo que se evite a retirada de operação dos conversores.

Foi analisado o comportamento da potência elétrica produzida por geradores eólicos quando da ocorrência de variações na velocidade do vento. Para velocidades do vento acima da média esperada, o controle do ângulo de passo permite a operação dos geradores dentro de limites seguros. Para velocidades do vento abaixo da média esperada, o controle do ângulo de passo possibilita a operação a potência nominal até um limite mínimo de velocidade do vento, o que depende dos parâmetros do sistema turbina-gerador.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. A. Pöller, 2003, "Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms". *Paper accepted for presentation at IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23<sup>th</sup> - 26<sup>th</sup>, Bologna, Italy;*
- [2] J. G. Slootweg, H. Polinder and W. L. Kling, 2001, "Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator". *IEEE Power*

*Engineering Society Summer Meeting*, July 15-19;

[3] P. Kundur, 1994, "Power System Stability and Control". *Book*, Mc.Graw Hill;

[4] W. S. Mota, L. S. Barros, F. M. P. Pamplona, A. N. Epaminondas, E. R. Braga Filho, A. M. Formiga e A. A. Santos, Simulação Dinâmica de Unidades de Geração Eólica Ligadas a um Sistema de Potência, *XV CBA - Congresso Brasileiro de Automática*, Gramado – RS, Setembro de 2004;

[5] J. A. Peças Lopes and R. Almeida, 2004, "Descrição de Modelos Matemáticos de Máquinas de Indução Convencional e Duplamente Alimentada e Estratégias de Controlo para Estudo Dinâmico e de Estabilidade Transitória",

*Trabalho de Consultoria para o ONS Brasil*, INESC PORTO;

[6] N. Jenkins, L. Holdsworth and X. Wu, 2002, "Dynamic and Steady-State Modelling of the Double-Fed Induction Machine (DFIM) for Wind Turbine Applications". *Internal MCEE UMIST*;

[7] H. Akagi, Y. Kanazawa and N. Akira, 1984, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 1A-20, No. 3. May/June;

[8] W. S. Mota, 2003, "Programa de Estabilidade Transitória - ESTABEOLICA® - UFCG/CELPE", Brasil.

