

UM MODELO DE COMPORTAMENTO DE CONVERSORES EÓLICOS DE EIXO HORIZONTAL

A.I. ESTANQUEIRO

LNETI - Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial
Departamento de Energias Renováveis
Az. Lameiros, Est. do Paço do Lumiar
1699 - Lisboa Codex

0 - Resumo

Neste trabalho, desenvolvido no âmbito de uma dissertação de Mestrado, apresenta-se um modelo de simulação dinâmico integrado de conversores eólicos de eixo horizontal (HAWT).

O modelo, aplicável a turbinas de eixo horizontal equipadas com gerador assíncrono, permite descrever o funcionamento de um conversor eólico operando sob condições de vento variável, ligado à rede de distribuição do sistema de energia eléctrica (SEE) com diferentes valores de potência de curto-circuito. Este modelo é aplicável a funcionamento em regime estacionário ou transitório da rede eléctrica ou do gerador eléctrico.

Considera-se o aerogerador dividido em dois componentes fundamentais, o rotor eólico - turbina propriamente dita - e o gerador de indução. Para a modelação do rotor eólico foi desenvolvido um método numérico que permite a determinação de uma equação característica de uma turbina. Este método é baseado numa modificação do modelo de simulação de propulsores e turbinas PROPSHAFT que recorre à Teoria de Glauert. Para descrever o comportamento do gerador assíncrono foi utilizado um modelo não linear com base na Teoria de Von der Embse.

Pretendendo-se conhecer a característica de funcionamento de uma turbina eólica ligada ao SEE, sob várias condições de vento, e para regime estacionário e transitório de operação do gerador eléctrico e da rede de distribuição, foi simulado um conjunto de situações que englobam funcionamento em regime permanente, ligação à rede do conversor e curto-circuito aos terminais do gerador eléctrico, para dois locais com potência de curto-circuito no ponto de interligação diferente. Estes resultados são posteriormente comparados com os valores obtidos experimentalmente para a turbina AEROMAN 12/20 instalada na "Unidade Piloto de Energia Eólica do LNETI/DER em Lourel/Sintra".

1 - Introdução

No início dos anos noventa, o estudo das turbinas eólicas saiu do domínio da investigação onde esteve situado durante as duas últimas décadas, para entrar verdadeiramente numa fase de produção e utilização industrial. A tecnologia de conversão da energia do vento em energia eléctrica está já desenvolvida de modo a permitir a operação de turbinas isoladas ou mesmo parques eólicos. desde que instaladas em sítios criteriosamente seleccionados, sem que

as exigências técnicas de controlo e manutenção sejam superiores às de qualquer outra fonte de energia.

Na instalação de uma unidade de aproveitamento da energia do vento, o factor determinante no sucesso do projecto, é a selecção do local. Neste capítulo, uma das áreas sobre a qual se prossegue no desenvolvimento de modelos físicos dos fenómenos é a integração das turbinas e parques eólicos na rede de distribuição do sistema de energia eléctrica.

Em Portugal, a instalação de parques eólicos pode ser encarada como um investimento rentável, desde que os incentivos financeiros convenientes sejam facultados, uma vez que o estatuto do Auto-Produtor (Decreto-Lei 189/88) permite que este produza energia eléctrica e a venda à empresa distribuidora de energia eléctrica (EDP).

Os maiores contratempus no projecto de instalação de um parque eólico surgem normalmente nesta fase, dado que as empresas distribuidoras de energia eléctrica estão habituadas a gerir fontes de energia convencionais cuja produção de energia, além de ser previsível -como é o caso das centrais hidroeléctricas- é totalmente controlável. As empresas distribuidoras quando, tal como acontece com a EDP, têm uma posição "monopolista" no mercado da energia eléctrica, não estão -se a isso não forem obrigadas- receptivas a fontes variáveis, não previsíveis e dificilmente controláveis como os conversores de energia do vento e de outras fontes de energias renováveis.

No decurso deste trabalho desenvolveu-se um modelo de conversores eólicos de eixo horizontal equipados com geradores de indução, que constitui a configuração técnico-económica mais interessante e, por isso, a mais vulgar no mercado.

2 - Modelo do Aerogerador

2.1 - Modelo Analítico

O modelo foi desenvolvido tendo em vista uma turbina de eixo horizontal equipada com gerador de indução, no modo de funcionamento CSCF ("*constant speed constant frequency*", deve ter-se em atenção que esta designação do modo de funcionamento não é clara, uma vez que a velocidade de rotação é variável, embora limitada a uma gama relativamente estreita). O gerador de indução encontra-se ligado ao SEE através de uma linha de transmissão.

O modelo prevê que potência reactiva necessária à excitação do gerador eléctrico possa ser fornecida pelo SEE ou localmente, por meio de um banco de condensadores. São ainda condições de aplicabilidade do modelo, o funcionamento em regime de vento variável (binário de accionamento variável no tempo) e a interligação ao SEE em locais de diferente potência de curto-circuito [1].

Modelo do Rotor Eólico

A análise do rotor eólico é feita através de um modelo desenvolvido a partir do código proposto por Hibbs e Radkey [2]. Este tem por base a teoria de Glauert introduzida para o estudo de propulsores e rotores de helicópteros.

Os modelos de rotores eólico habitualmente propostos para a determinação das características de funcionamento das turbinas eólicas [3] (coeficiente de potência e de binário), nos quais são calculados os coeficientes de interferência de velocidade axial e tangencial numa pá previamente dividida em sectores anelares, não são de fácil adaptação a um modelo temporal de um aerogerador, nomeadamente no que se refere à variação temporal do vento. A serem aplicados obrigariam a uma integração das forças actuantes nas pás para cada intervalo de tempo de modo a calcular o binário motor no veio. Deste modo, optou-se pela determinação de uma equação característica de binário da turbina $T_M = f(\Omega, V_0)$, em que Ω é a velocidade de rotação da turbina e V_0 o vento não perturbado, simulando assim o seu desempenho.

A equação característica obtida para a turbina estudada - AEROMAN 12/20 é uma função linear da velocidade de rotação:

$$T_M(\Omega, V_0) = A(V_0)\Omega + B(V_0) \quad (1)$$

em que os parâmetros dependentes da velocidade do vento $A(V_0)$ e $B(V_0)$, para esta turbina, tomam a forma:

$$A(V_0) = A_1 V_0^\alpha + A_2 V_0^\beta + A_3$$

$$B(V_0) = B_1 V_0^\delta + B_2 V_0^\gamma + B_3$$

(2-a,b)

A evolução da equação característica da turbina AEROMAN 12/20 bem como os resultados do modelo modificado de Hibbs e Radkey encontram-se representados na Figura 1.

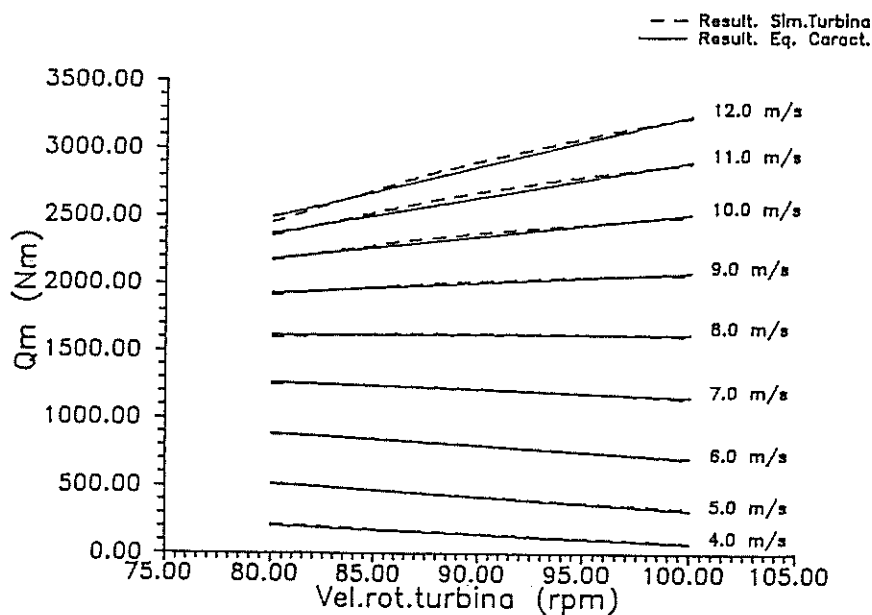


Fig. 1 - Binário vs velocidade de rotação, para velocidade do vento variável

Modelos do Gerador de Indução e do Equipamento Eléctrico

O modelo analítico escolhido para simular o funcionamento do gerador de indução foi desenvolvido por Ferreira de Jesus [4] e tem como principal característica incluir os efeitos da saturação do circuito magnético. Este modelo é baseado na Teoria Geral dos Circuitos de Von der Embse [5] e na hipótese de uma curva de histerese única para descrever o comportamento do material magnético, i.e. desprezando as perdas no ferro.

O modelo permite simular o funcionamento de um aerogerador ligado à rede de distribuição de energia eléctrica através de uma linha de transmissão, bem como a ligação de cargas ou de uma fonte de potência reactiva no barramento da turbina tal como representado na Figura 2.

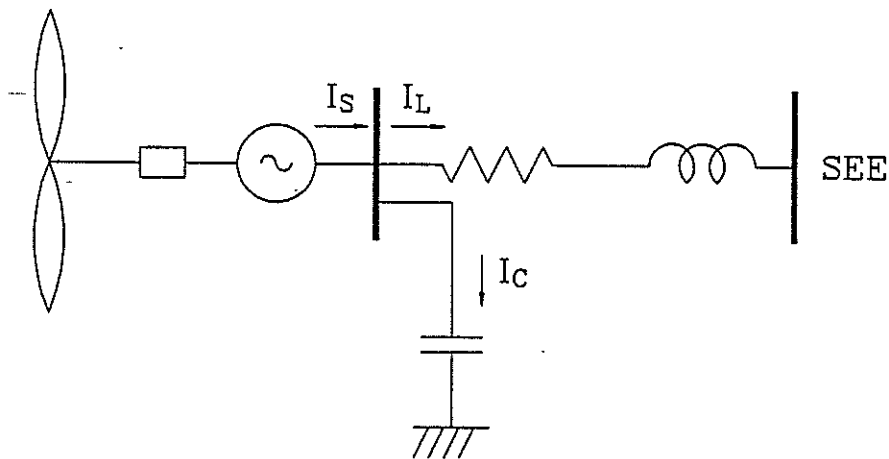


Fig. 2 - Ligação do aerogerador ao SEE

As equações que descrevem o funcionamento do gerador de indução, em coordenadas $(d,q,0)$, num referencial síncrono com a velocidade angular do binário electromagnético, ω , são, para o circuito do estator:

$$v_{ds} = -r_s i_{ds} + \omega l_{qs} i_{qs} - \omega \Psi_{qs} - l_{ds} \frac{\partial i_{ds}}{\partial t} + \frac{\partial \Psi_{ds}}{\partial t}$$

$$v_{qs} = -r_s i_{qs} - \omega l_{ds} i_{ds} + \omega \Psi_{ds} - l_{qs} \frac{\partial i_{qs}}{\partial t} + \frac{\partial \Psi_{qs}}{\partial t}$$

(3-a,b)

e, para o circuito do rotor:

$$0 = -r_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + \frac{\partial \lambda'_{dr}}{\partial t}$$

$$0 = -r_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + \frac{\partial \lambda'_{qr}}{\partial t}$$

(4-a,b)

onde, i e v são respectivamente a intensidade de corrente e a tensão, r representa a resistência do enrolamento, l o coeficiente de indução, Ψ o fluxo de magnetização e λ o fluxo total do rotor. Os índices d e q referem-se às componentes directa e em quadratura das grandezas e os s e r correspondem às variáveis do estator e do rotor. As equações (3-a,b) e (4-a,b) permitem escrever as equações de estado para o gerador de indução.

As equações de estado para o banco de condensadores são, tomando o mesmo referencial e sistema de coordenadas:

$$\frac{\partial v_{ds}}{\partial t} = \frac{1}{C} (i_{ds} - i_{dL} + \omega C v_{qs})$$

$$\frac{\partial v_{qs}}{\partial t} = \frac{1}{C} (i_{qs} - i_{qL} + \omega C v_{ds})$$

(5-a,b)

onde i_{dL} e i_{qL} se referem, respectivamente, às componentes directa e em quadratura da intensidade da corrente na linha de transmissão.

Esta modelação dos componentes eléctricos assume que uma linha de transmissão pode ser correctamente representada através de uma resistência e de uma reactância. Logo, no sistema de coordenadas e referencial referido anteriormente, as equações de estado que se obtêm para a linha de transmissão são:

$$\frac{\partial i_{dL}}{\partial t} = \frac{1}{L_L} (v_{ds} - v_{dL} - r_L i_{dL} + \omega L_L i_{qL})$$

$$\frac{\partial i_{qL}}{\partial t} = \frac{1}{L_L} (v_{qs} - v_{qL} - r_L i_{qL} - \omega L_L i_{dL})$$

(6-a,b)

onde, v_{dL} e v_{qL} representam as componentes directa e em quadratura da tensão e r_L e L_L correspondem, respectivamente, à resistência e ao coeficiente de indução equivalentes da linha de transmissão. O escorregamento define-se, como habitualmente, por:

$$s = \frac{\omega_s - n_p \omega_r}{\omega_s}$$

(7)

onde n_p representa o número de pares de pólos do gerador de indução, ω_r a velocidade de rotação do eixo referida à velocidade de rotação do gerador de indução e ω_s a velocidade de sincronismo do gerador.

Equação do veio

O eixo da turbina eólica e o do gerador de indução estão ligados por meio de uma caixa de velocidades considerada como ideal. A equação dinâmica que representa o veio nesta situação é:

$$J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = T_M - T_{EM} \quad (8)$$

sendo J a inércia do sistema, θ o ângulo do rotor relativamente a uma referência, T_M o binário mecânico, já conhecido e T_{EM} o binário electromagnético.

2.2 - Modelo Numérico

O comportamento dinâmico da turbina eólica foi descrito através da equação característica de binário. Para o modelo numérico do gerador de indução foi utilizada a versão implementada por Castro [6] para descrever o funcionamento deste gerador, cuja introdução se deve a Ramshaw e Xie para as máquinas síncronas [7].

O modelo do gerador de indução foi adaptado ao regime de funcionamento com binário motor variável no tempo [1,8,9], sendo este fornecido pela turbina eólica, simulado a partir de dados de vento real (eq. 1).

O modelo do conversor eólico desenvolvido com base nestes dois modelos - da turbina eólica e do gerador de indução - permite descrever o comportamento de aerogeradores. A velocidade de rotação do eixo é referida à velocidade do gerador eléctrico, para todas as variáveis calculadas.

O regime permanente do aerogerador, em funcionamento normal sob vento variável, é simulado como uma sequência de regimes permanentes do ponto de vista do gerador de indução. Para levar a cabo este procedimento, foram tomados dois incrementos no tempo, um mecânico e outro eléctrico, respectivamente Δt_m e Δt_e . Para assegurar a validade do modelo há que garantir a condição $\Delta t_m \gg \Delta t_e$.

No aplicação do modelo utiliza-se a constante de inércia, definida como:

$$H_i = \frac{\frac{1}{2} J \left(\frac{\omega_s}{n_p}\right)^2}{S_b} \quad (9)$$

A expressão (9) traduz o quociente entre a energia cinética do rotor a a potência de base calculada. Esta define-se como:

$$S_b = \sqrt{3} U_N I_N \quad (10)$$

onde U_N e I_N representam, respectivamente, a tensão e corrente nominais.

3 - Simulação do Aerogerador

3.1 - Utilização do Modelo

Este modelo pretende-se válido na gama de velocidades em que a turbina opera com ângulo de ataque constante, i. e. entre 3.5 m/s e aproximadamente 14 m/s (de facto a turbina entre em controlo de potência para uma velocidade de 11.5 m/s).

Os parâmetros do aerogerador simulado [1] são os seguintes, para a turbina:

Pás: Duas, com corda e ângulo de torção variáveis sendo constituídas por perfis NACA 4415,4418,4421 e 4424.

Dimensões do rotor: 12 metros de diâmetro. Para determinar a performance deste pelo programa Propshaft modificado, o rotor foi dividido em 10 elementos.

Equação característica: Os coeficientes e expoentes dos termos da equação são os seguintes, para a turbina AEROMAN 12/20:

$$A_1 = 1.18 \times 10^2, A_2 = -3.29 \times 10^2, A_3 = 2.74 \times 10^2$$

$$B_1 = -5.95 \times 10^2, B_2 = 4.01 \times 10^3, B_3 = -6.79 \times 10^3$$

$$\alpha = 0.772, \beta = 0.463$$

$$\delta = 1.46, \gamma = 0.79$$

e, para o gerador de indução e restante equipamento eléctrico (de notar que os condensadores são sempre calculados de modo a fornecerem a potência reactiva necessária ao gerador na zona linear da característica electromagnética):

Tensão nominal, $U_N = 380V$

Corrente nominal, $I_N = 35A$

Resistência do rotor, $R_r' = 0.140\Omega$

Reactância do rotor, $X_r' = 1.2\Omega$

Resistência do estator, $R_s' = 0.223\Omega$

Reactância do estator, $X_s' = 1.2\Omega$

Número de pares de pólos, $n_p = 2$

Potência de base, $S_b = 24.4KVA$

Constante de inércia, $H_i = 0.88s$

Binário de base, $T_b = 156Nm$

A resistência e reactância da linha de transmissão são calculadas a partir da relação de curto-circuito no ponto de interligação (a relação de curto-circuito é definida como o quociente entre a potência de curto-circuito no ponto de interligação, e a potência nominal instalada, i.e. $r_{cc} = S_{cc}/S_N$):

$$r_{cc} = 3 \Rightarrow R_L = 0.172\Omega, X_L = 1.963\Omega$$

$$r_{cc} = 20 \Rightarrow R_L = 0.0258\Omega, X_L = 0.295\Omega.$$

A relação de transmissão da caixa de velocidades é 1:17.2. A característica de magnetização do gerador de indução, é simulada numericamente pela expressão (11) representada na Figura 3:

$$I_m = K_1 E + K_m E^m \quad (11)$$

sendo I_m a corrente de magnetização, E a força electromotriz e $K_1, K_m, e m$ constantes, que para este gerador tomam os valores, $K_1 = 0.3287, K_m = 0.0463 e m = 17$.

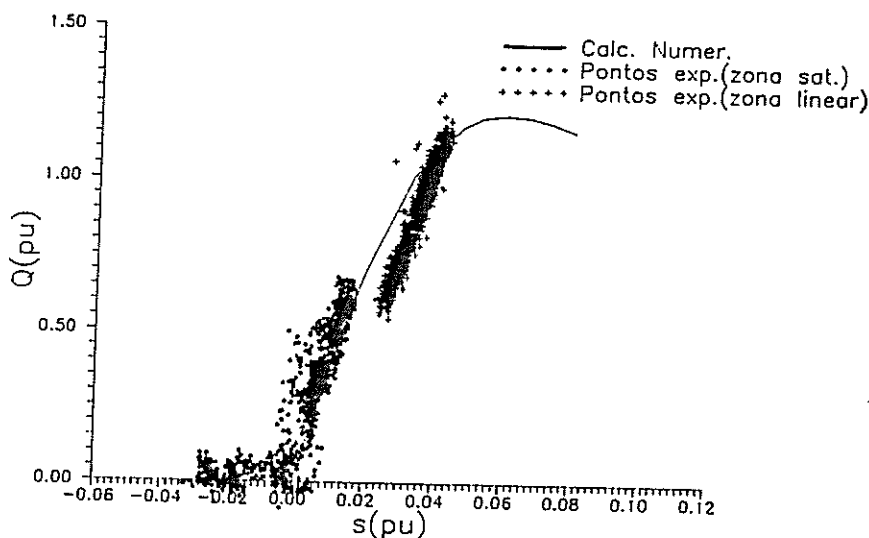


Fig. 3 - Característica electromagnética do gerador assíncrono.

A característica electromecânica de binário desta máquina, determinada para o modo de funcionamento como gerador e os valores obtidos experimentalmente encontram-se representados na Figura 4.

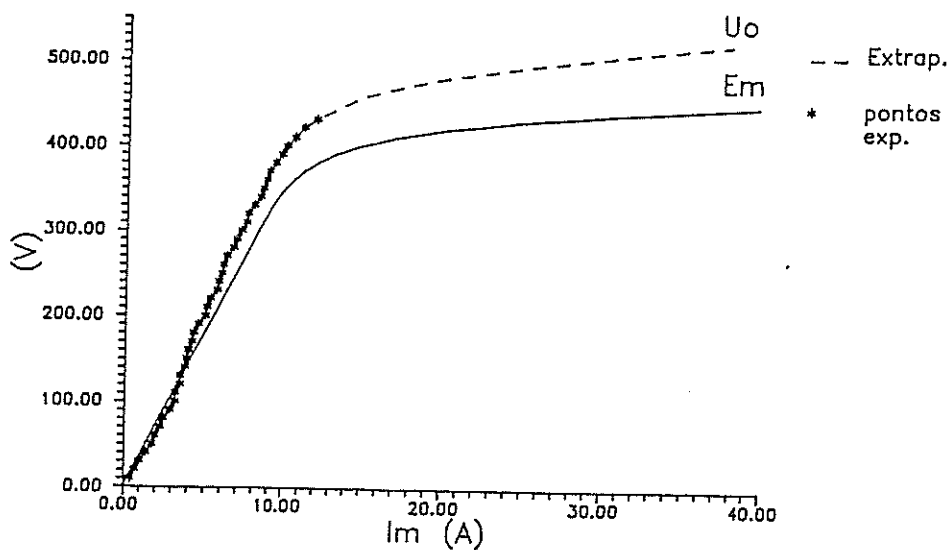


Fig. 4 - Característica electromecânica de binário do gerador de indução

3.2 - Resultados Experimentais e Numéricos

Os resultados experimentais e numéricos foram obtidos com os dados de vento real (médio e forte) que se apresentam na Figura 5. Os resultados experimentais foram adquiridos sob funcionamento da turbina em regime permanente, para condições de vento médio (Fig.6).

Apresentam-se também os resultados da simulação numérica do funcionamento do aerogerador, com base no modelo desenvolvido. Estes correspondem às seguintes situações: i) funcionamento em regime permanente sob condições de vento médio (Fig.7); ii) ligação à rede sob condições de vento forte para dois locais do SEE de relação de curto-circuito diferente, $r_{cc}=3$ (Fig.8) e $r_{cc}=20$ (Fig.9).

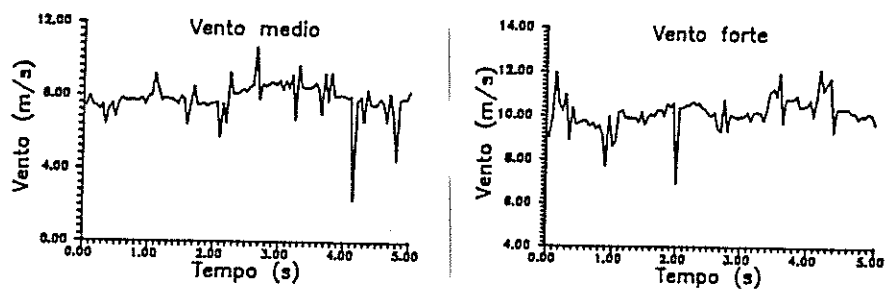


Fig. 5 - Ficheiros de vento real.

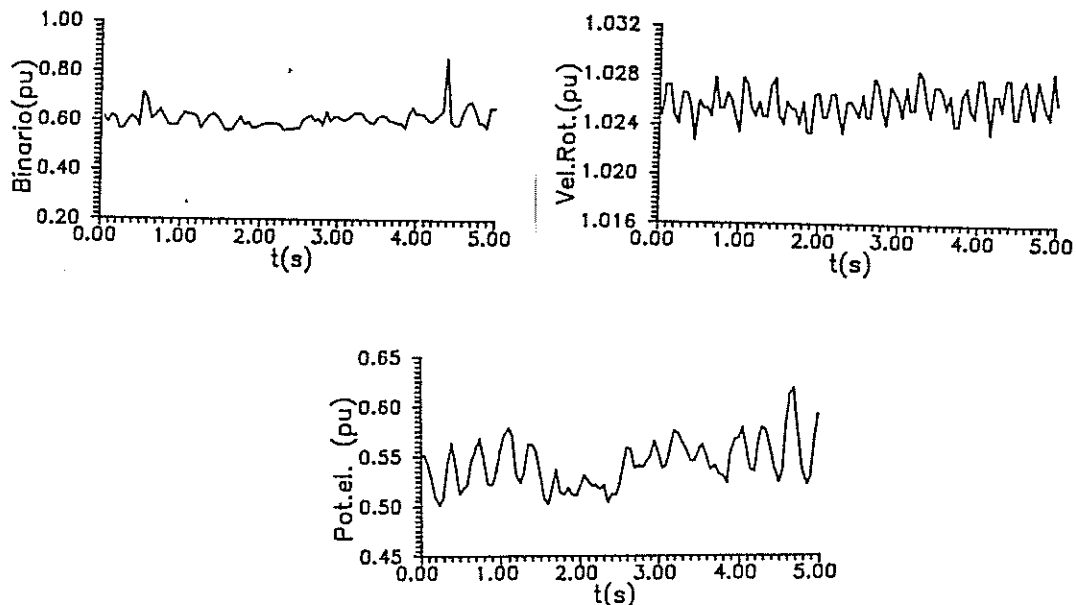


Fig. 6 - Resultados experimentais para funcionamento do aerogerador sob condições de vento médio.

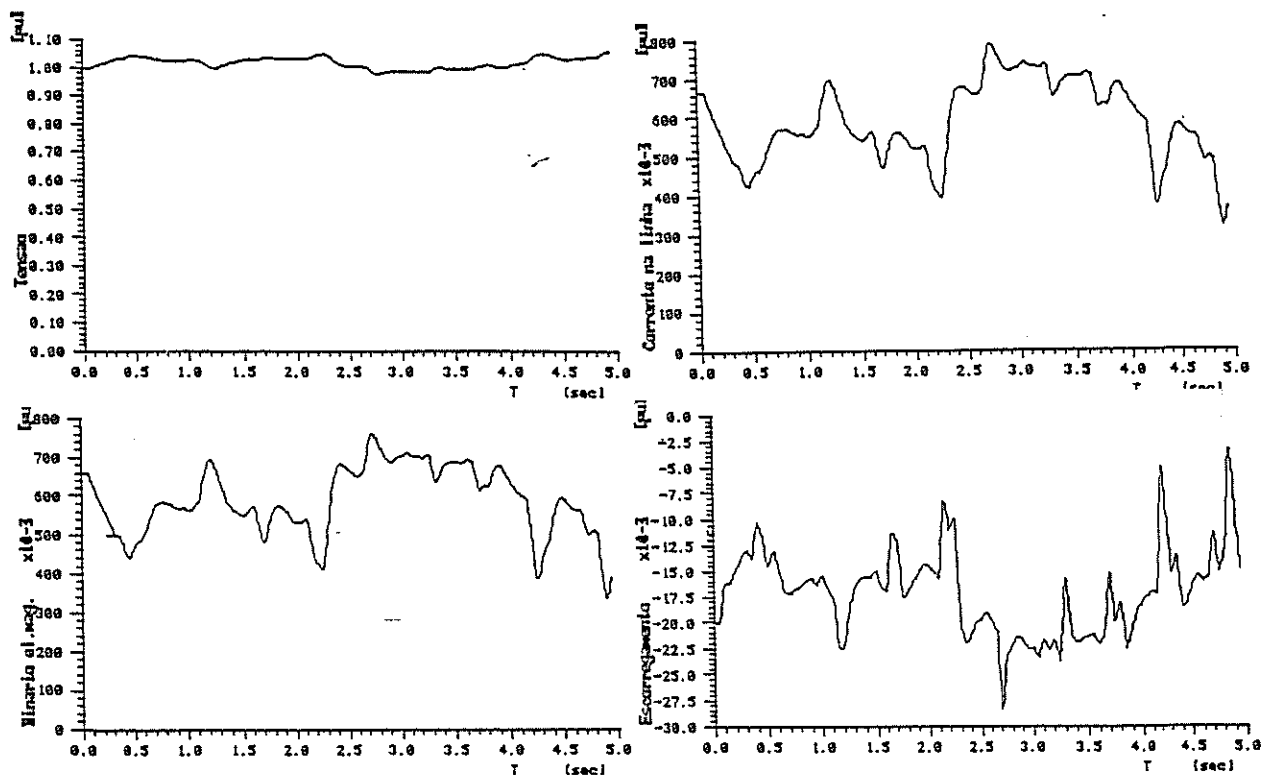


Fig. 7 - Funcionamento em regime permanente sob condições de vento médio e $rcc=3$.

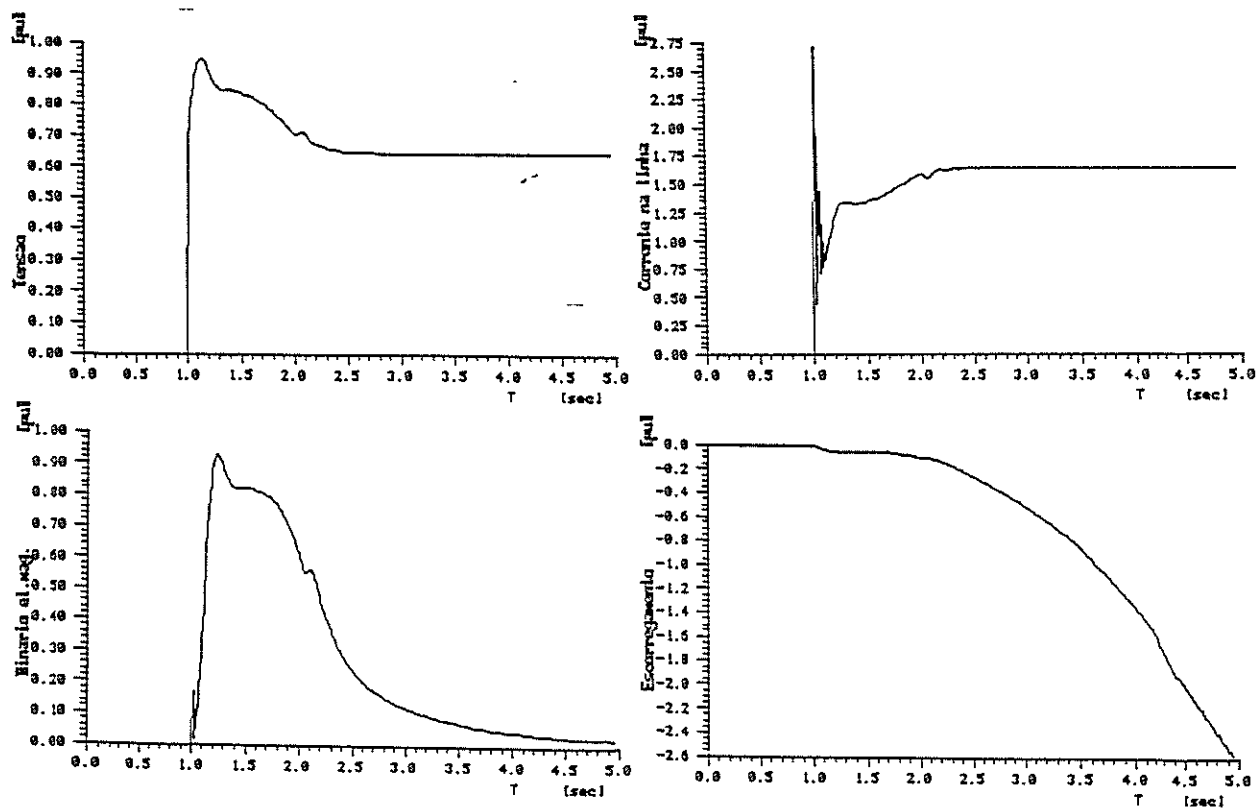


Fig. 8 - Ligação à rede sob condições de vento médio e $rcc=3$.

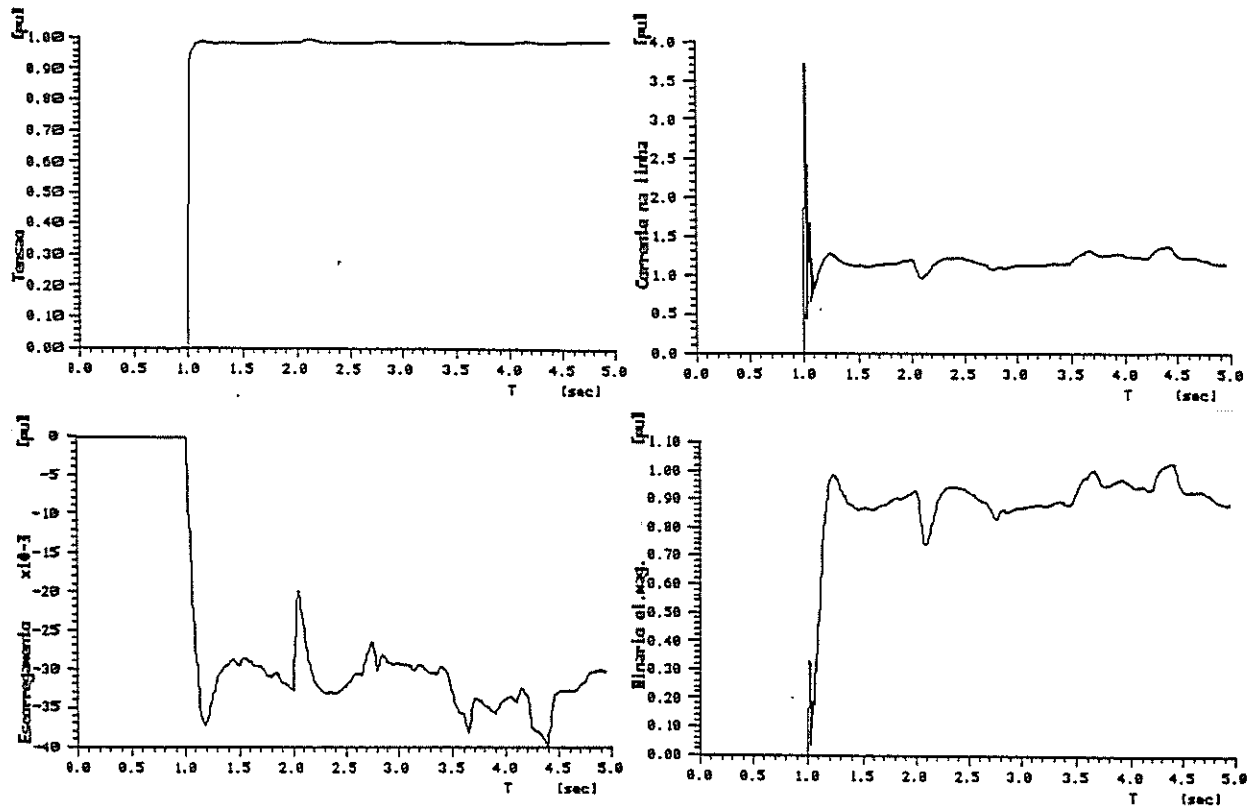


Fig. 9 - Ligação à rede sob condições de vento médio e $rcc=20$.

4 - Análise dos Resultados e Conclusões

As diferenças que resultam da comparação entre os resultados obtidos experimentalmente, dos quais se apresenta o funcionamento do aerogerador em regime permanente sob condições de vento médio, e os resultados obtidos por aplicação do modelo desenvolvido, podem atribuir-se a vários factores, de entre os quais se apontam: i) desprezo do efeito de filtragem que o rotor eólico introduz sobre as componentes de alta frequência do vento; ii) modelação das pás como estruturas rígidas; iii) desprezo do amortecimento no veio de transmissão; iv) parâmetros do gerador eléctricos lineares (com excepção da reactância de magnetização).

Está em fase de arranque o trabalho experimental necessário para proceder à aplicação deste modelo a outros conversores de energia, mais "típicos" do ponto de vista de dimensões da turbina e, conseqüentemente, da potência nominal da máquina. Destes ensaios espera-se obter a informação necessária para introduzir algumas alterações no modelo, nomeadamente no que respeita à função de transferência do rotor e ao amortecimento no veio. Do ponto de vista de modelação do SEE o modelo contempla já a simulação de transformadores, cargas locais e permite calcular a tensão nos barramentos da rede próximos do ponto de interligação do gerador [9].

Referências Bibliográficas

- [1] ESTANQUEIRO, A. I.; "*Um Modelo de Comportamento de Conversores Eólicos de Eixo Horizontal*", Tese de Mestrado, IST, 1991.
- [2] HIBBS, B. and RADKEY, R.L.; "*Calculating Rotor Performance with the revised Prop Computer Code*", Ed. National technical Information Service, USA, 1983.
- [3] TANGLER, J.L.; "*Horizontal Axis Wind Systems. Rotor Performance Model Comparison - A Compendium*", Ed. National technical Information Service, USA, 1983.
- [4] FERREIRA DE JESUS, J.M.; "*A Model for Saturation in Induction Machines*", IEEE Transactions on PAS, IEEE/PES Winter Meeting, Paper 88, WM014-3, 1988.
- [5] Von der EMBSE, U.A.; "*New Theory of Non-Linear Commutator Machines*", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-87 n°9, 1968.
- [6] CASTRO, R.; "*Gerador de Indução. Utilização em Pequenas Centrais Hidroeléctricas*", Tese de Mestrado, IST, 1988
- [7] RAMSHAW, R.S. and XIE, G.; "*Non Linear Model of non Salient Synchronous Machines*", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS 10, n°7, pp 1809-1815, 1984.
- [8] ESTANQUEIRO, A.I; FERREIRA DE JESUS, J.M.; GIL SARAIVA, J. A. "*WECS Unsteady Power Output Simulation*", Proceedings of the 1991 EWEC, pp 618-622, Amsterdam, 1991.
- [9] ESTANQUEIRO, A.I; FERREIRA DE JESUS, J.M.; LALOS, D.; "Transient Behaviour of a WEC under different Load Conditions"; European Seminar on the "Potential for the Small & Medium Sized Wind Energy Application in Mediterranean Countries", Rhodes, 1992.