



ANAIS
PROCEEDINGS

III CBE
Rio de Janeiro, Outubro de 1984

TÉCNICA PARA TRANSMISSÃO DE ENERGIA EÓLICA

D. Bastos Netto*
B. J. E. Zettl**

* INPE - Cachoeira Paulista - SP
** IPQM - Rio de Janeiro - RJ

Sumário

O emprego de Engenheiros Eólicos de eixo horizontal (moinhos) ou de eixo transversal (Savonius, Darrieus, etc) envolvem certas dificuldades nos seus usos para a geração de energia elétrica quanto ao tamanho, peso e a técnica de acoplamento à malha por ventura existente, para a transmissão daquela energia. O uso de máquinas especiais como os geradores de campo modulado constitui-se numa possível resposta para o problema. O presente trabalho propõe outra solução, que envolve o uso da associação de pequenos engenheiros eólicos que, acoplados em malha hidráulica, movem apenas uma turbina comum que aciona um único gerador elétrico (Pat. Req. - PI 8001559 de 14/03/80).

Abstract

One of the major problems in the use of Wind Grids for direct generation of electrical power is that of matching voltages and frequencies of signals from several windmill - driven alternators so to be able to get them properly on line. This can be done through the use of Modulated Field Generators. Other setbacks are the weight and size of the several existing wind - driven generator units. This work suggests another option which consists in the coupling of several wind turbines (either horizontal axis or transverse or both) through a hydraulic network, so that a hydraulic turbine picks up the overall result and drives a single alternator (Pat. Req. - PI 8001559 de 14/03/80 do IPQM).

INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas no uso do vento para a geração direta de energia elétrica é aquele do acoplamento correto das voltagens e frequências dos sinais gerados por diversos alternadores movidos por engenhos eólicos de modo a colocá-los propriamente na rede por ventura existente na região (outros problemas naturalmente são o peso, o tamanho e a sofisticação requeridas por tais engenhos). Claro que o uso de geradores de Campo Modulado [1] ou o emprego engenhoso de turbinas delta associadas com compressores de ar como recentemente mostrado por Kentfield [2] podem contornar este problema.

Entretanto, tendo em mente principalmente o fato cru de que a viabilidade no emprego de energia eólica hoje, neste país, implica necessariamente na ausência de meios sofisticados de implantação e manutenção, é mister que se procure outra opção, mais simples e menos dispendiosa. Daí o presente trabalho que sugere o acoplamento de diversas turbinas eólicas (que por ventura sejam montadas num "campo de ventos") através uma malha hidráulica. Neste caso cada turbina (moinho de vento) move uma bomba d'água (moinho d'água), transferindo assim energia para a água em tubulação (ou canal aberto). Uma turbina hidráulica recebe o movimento global e aciona um único alternador. Independentemente das perdas, esta parece ser uma opção simples para o problema em pauta. E mais, a energia coletada pode também ser armazenada através o estabelecimento de altura dinâmica apropriada com o uso de carneiros hidráulicos, numa variação do trabalho de Eskinazi e Goethals [3].

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Considere-se uma turbina eólica qualquer acionando um sistema hidráulico de bombeamento. A turbina é movimentada por um vento de velocidade V (distribuição estocástica no tempo como sugerido em [3]) e como se sabe, seja a turbina de eixo horizontal (ie alinhada ao vento) ou seja ela de eixo transversal (perpendicular ao vento), sua performance é função da variável adimensional X , razão da velocidade periférica pela velocidade do vento é apresentada normalmente pelos coeficientes de potência, C_p e torque, C_T , onde:

$$X = \frac{W_t R}{V_\infty} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{P_t}{1/2 \rho V_\infty^3 A_s} \quad (2)$$

e

$$C_T = \frac{T_t}{1/2 \rho A_s R V_\infty^2} \quad (3)$$

onde W_t é a velocidade de rotação da turbina, R seu raio máximo, P_t a potência extraída no eixo, $\rho = 1.226 \text{ kg/m}^3$ a densidade do ar, A_s a área varrida pela turbina (para o caso de eixo horizontal, $A_s = \pi R^2$, obviamente), T_t o tor

que no eixo da turbina (ie, T_t = Torque Aerodinâmico - Torque devido ao Atrito).

Já a potência hidráulica na descarga da bomba, P_B , pode ser escrita:

$$P_B = T_B W_B \eta_B = Q \rho g H \quad (4)$$

onde Q é a vazão volumétrica, ρ a densidade do fluido, T_B o Torque da bomba, W_B sua velocidade angular, η_B a eficiência e H a altura dinâmica total (perdas incluídas). Daí,

$$T_B W_B = Q (\rho g H / \eta_B) \quad (5)$$

Em condições ideais $X = X_0$ e $C(X) = C_{P0}$. Nesta situação W_t varia linearmente com V_m e a equação (2) pode ser escrita,

$$T_t W_t = \frac{1}{2} \rho A_s V_m^3 C_{P0} \quad (6)$$

ou

$$T_t = \frac{1}{2} \rho A_s R (C_{P0} / X_0^3) W_t^2 \quad (7)$$

ie o Torque varia com o quadrado da velocidade angular.

As características de acoplamento turbina eólica/bomba foram tratadas por Eskinazi e Goethals [4] que inclusive discutiram aspectos da operação do sistema no ponto de projeto, fora do mesmo, suas condições de partida e o bombeamento por mono e multi estágios levando em consideração distribuição estatística do vento.

É claro que se a turbina e a bomba estiverem rigidamente acopladas, $W_t = W_B$ e a turbina deve-se adaptar à operação fora do ponto de projeto de modo a fornecer o torque constante necessário para a bomba. (Figura 1).

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Considere-se agora um campo de ventos cuja probabilidade (em percentagem do tempo total) dese ter velocidade maior que V_m é dada por uma distribuição Gaussiana [4] isto é,

$$P(U > V_m/t) = \frac{t}{\tau} \exp(-\alpha V_m^2) \quad (8)$$

onde t é o tempo, τ o tempo total de amostragem e α uma constante sazonal e local.

Assuma-se que na região considerada existem N conjuntos turbina/ bomba iguais interligadas por canalizações de comprimento l_i e diâmetro d_i e com uma turbina hidráulica convencional acoplada a um alternador. É pertinente mencionar que, dependendo do caso, pode ser mais apropriada interligação em

série ou em paralelo.

A energia retirada no eixo de uma turbina i no tempo t pode ser escrita

$$E_i = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \int_0^1 C_p V_\infty^3 d\psi \quad (9)$$

como

$$d\psi = -2\alpha V_\infty \exp(-\alpha V_\infty^2) dV_\infty \quad (10)$$

e $\psi = 0$ quando $V_\infty = \infty$, $\psi = 1$ se $V_\infty = 0$, então a potência média no período τ será:

$$\bar{P}_t = \rho \pi R^2 \alpha \int_0^\infty C_p V_\infty^4 \exp(-\alpha V_\infty^2) dV_\infty \quad (11)$$

Tomando-se $C_p = C_{p0}$ em qualquer instante,

$$\bar{P}_t = \frac{3 C_{p0}}{8\alpha} \rho \pi R^2 \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \quad (12)$$

como já mostrado em [4].

E a potência hidráulica na descarga da bomba i será,

$$\bar{P}_{Bi} = Q_i \rho_a g H_i = \frac{3 C_{p0}}{8\alpha} \rho \pi R^2 \eta_B \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \quad (13)$$

Independendo da disposição (série ou paralelo) da malha de turbinas eólicas/bombas hidráulicas, a turbina hidráulica receberá em média, naquele período,

$$\bar{P}_{TH} = \sum_{i=1}^n Q_i \rho_a g H_i - L \text{ Perdas nas canalizações} \quad (14)$$

$$\bar{P}_{TH} = \frac{N C_{p0}}{8\alpha} \rho \pi R^2 \eta_B \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} - L \text{ Perdas} \quad (15)$$

assumindo-se as N conjuntos idênticos.

As perdas naturalmente podem ser escritas como,

$$L \text{ Perdas} \sim L 4f_i \frac{1}{d_i} \frac{\rho_a V_i^2}{2g} \quad (16)$$

onde o fator de atrito f_i é função do Número de Reynolds na canalização i , $Re_y = \rho V_i d_i / \mu$. Observe-se que, num campo de vento não uniforme a associação em série de dois conjuntos turbina/bomba, um recebendo vento outro não, pode implicar em perdas maiores que as indicadas na equação (15), pois aí a bomba se comporta como turbina e a turbina como ventilador. Óbvio, existem diversos modos de se contornar este problema.

Em geral, a potência média no barramento do alternador pode então ser escrita

$$\bar{P}_{alt} = \bar{P}_{TH} \eta_{alt} \eta_H \quad (17)$$

onde η_{alt} e η_H são eficiências do alternador e da turbina hidráulica respectivamente.

PERFORMANCE

A performance do sistema pode ser estimada considerando-se um modelo simplificado descrito em função das diversas perdas de carga nos elementos do conjunto, para as condições mais prováveis de vento na região em pauta.

É claro que a eficiência global η_G pode ser escrita:

$$\eta_G = \phi_T \phi_B \phi_{TR} \eta_H \eta_{alt} \quad (18)$$

onde

$$\eta_G = \frac{\text{Potência entregue à malha elétrica num tempo T}}{\text{E das potências existentes nos acessos das turbinas eólicas num tempo T}}$$

$$\phi_T = \frac{\text{E potências nos eixos das turbinas eólicas num tempo T}}{\text{E das potências existentes aos acessos das turbinas eólicas num tempo T}}$$

$$\phi_B = \frac{\text{Potência total entregue à água num Tempo T}}{\text{E potências nos eixos das turbinas eólicas num Tempo T}}$$

$$\phi_{TR} = \frac{\text{Potência total na tomada da turbina hidráulica num tempo T}}{\text{Potência total entregue à água no tempo T}}$$

CONFIGURAÇÕES PROPOSTAS/CONCLUSÕES

As Figuras 2 e 3 mostram dois modos de se utilizar a presente ideia: A primeira com canalização fechada, a outra com malha de canais abertos. Note-se que, dependendo da situação, a instalação de carneiro hidráulico e reservatório com altura para armazenagem de energia, pode ser muito simples.

Naturalmente a decisão sobre a associação correta dos pares turbina eóli

ca/bomba d'água carece do emprego de critérios clássicos de otimização, bem como a escolha do tipo mais adequado de turbina e seu dimensionamento para o problema específico ([4],[5]).

Finalmente, a escolha de um modelo, mesmo simplificado, capaz de mostrar as diversas interações existentes no problema proposto, embora pertinente e extremamente interessante, foge ao escopo deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Dr. W. Gill e J.A. de Carvalho Jr. do INPE pelas sugestões sempre corretas, nem sempre seguidas, bem como ao Sr. A.G. Comonian e à Sra. Vânia Maria Azevedo, também do INPE pelas competentes composição e datilografia do texto.

BIBLIOGRAFIA

1. ALLISON, H.J.; RAMAKUMAR, R. and HUGHES, W.L. - "A field Modulated frequency down conversion power System", IEEE, 1972. Transaction on Industry Applications IA 9 (2): 220 - 226.
2. KENTFIELD, J.A.C. - "Pneumatic Energy Transmittal in wind-power Systems", Journal of Energy, vol. 5, number 6, 1981, p-362.
3. ESKINAZI, S. and COETHALS, R. - "Multiple Pump Stage Loading of a Variable - rpm Wind Turbine, Journal of Energy, vol. 3, number 2, 1979, p - 114.
4. CRIMI, P. - "Performance Assessment of Flettner Wind Turbine, Journal of Energy, vol. 4, number 6, 1980, p - 281.
5. SHELDAHL, R.E., KLIMAS, P.C., FETZ, L.V. - Aerodynamic Performance of a 5 - m - Diameter Darrieus Turbine. Journal of Energy, vol. 4, number 5, 1980, p - 227.