



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

GPT 25  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS**

**MODELAGEM DO ROTOR DE TURBINA EÓLICA PARA  
UTILIZAÇÃO EM FLUXO DE CARGA**



**Alexandre Rocha Filgueiras \***

**Tadeu da Mata Medeiros Branco \*\***

**Ailson Pereira de Moura \***

**\* Universidade Federal do Ceará**

**\*\* Universidade Federal do Pará**

**RESUMO**

Os engenheiros de sistemas de potência costumam lidar com fontes geradoras de potência constante, o que não ocorre com a geração eólio-elétrica. Como a potência eólica é determinada a partir de uma função densidade de probabilidade, apresentando flutuações temporais, faz-se necessário verificar como se comporta e influencia a variação da velocidade de vento sobre as tensões da barras de um sistema no cálculo do fluxo de carga.

Este artigo apresenta um modelo de uma turbina eólica que se agrega a um programa de fluxo de carga desenvolvido em um sistema radial para estudos em regime permanente.

O fluxo de carga considera o monitoramento da tensão na barra de geração da usina eólica. Quando esta tensão exceder ao limite estabelecido, caso em que haverá um excesso de geração eólio-elétrica, o modelo da turbina eólica atuará no controle do ângulo de passo da pá (ângulo de *pitch*) restringindo a potência gerada, com a conseqüente redução da tensão da barra. Este modelo fornece o ângulo de *pitch* na situação de restrição de operação.

É bom lembrar que o resultado de um fluxo de carga é uma solução possível para um sistema, para um conjunto de entrada considerado.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistema de Potência, Fluxo de carga, Geração Eólica, Energia Renovável, Turbina Eólica.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Um dos pontos mais sensíveis da turbina eólica é o seu rotor, o qual é responsável pela absorção da energia cinética das massas de vento que incidem sobre o mesmo. Existem duas concepções de controle da velocidade nos rotores dos aerogeradores: *stall* e *pitch*. No controle por *stall* o rotor é fixo, enquanto no controle *pitch*, sistemas com acionamento hidráulico podem variar o ângulo de assentamento. Neste artigo considera-se a modelagem do rotor de uma turbina eólica com controle de *pitch*, pois o modelo permite a alteração deste ângulo através da supervisão da tensão em cada barra, restringindo a geração de potência eólico-elétrica. Indica também o ângulo ótimo de assentamento de operação, para o caso *stall*. Apresenta-se uma descrição das forças atuantes no rotor, a metodologia para modelagem e os resultados de simulações com comentários.

## 2.0 - FORÇAS SOBRE UM ROTOR

O conjunto de pás de um aerogerador e o cubo onde estão colocadas essas pás constitui o rotor eólico do aerogerador. É através deste conjunto de pás que o aerogerador extrai a energia cinética contida no vento.

Estas pás possuem elementos abaixo necessários ao entendimento do modelo proposto.

### 2.1 Pá de um Aerogerador

A moderna pá dos aerogeradores é constituída principalmente por fibra de vidro ou fibra de carbono com resina *epoxi*, isto devido as suas qualidades físicas, tais como: baixo peso, elevada resistência à fadiga e fácil laminação. A fácil laminação é importante, pois a pá possui um perfil (geometria) que lhe confere suas qualidades aerodinâmicas.

#### 2.1.1 Elementos da Pá de um Aerogerador

Tomando-se um corte transversal de um perfil de uma pá, como mostrado na figura 1, pode-se mostrar a posição de atuação dos vetores velocidade incidente do vento, velocidade tangencial e velocidade efetiva, o plano do rotor e a corda do perfil. Estes elementos estão descritos abaixo, como segue:

- Corda – segmento que liga a borda de ataque a borda de escoamento;
- Plano do rotor – plano de rotação das pás;
- Ângulo de ataque ( $\alpha$ ) – Ângulo entre a corda do perfil e a direção efetiva do vento;
- Ângulo de torção ( $\vartheta$ ) – Ângulo entre a corda do perfil e o plano do rotor;
- Ângulo de *Pitch* ( $\beta$ ) – Ângulo entre a velocidade efetiva e o plano do rotor ( $\beta = \alpha + \vartheta$ );
- Velocidade de incidência do vento ( $V$ ) – Velocidade na qual o vento ataca o perfil;
- Velocidade tangencial ( $u$ ) – Velocidade tangencial em cada raio  $r$  da pá, e
- Velocidade efetiva ( $C$ ) – Composição vetorial das velocidades tangencial e de incidência.

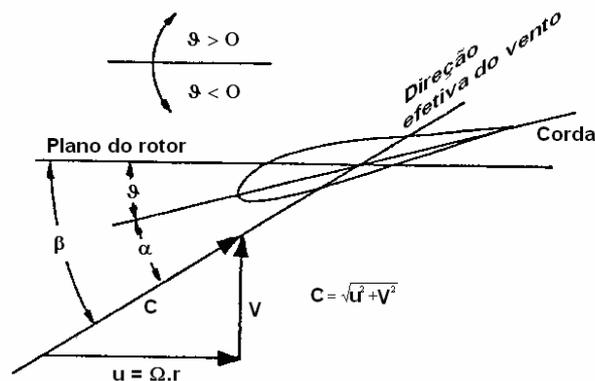


Figura 1 – Elementos de uma pá

Algumas definições são extraídas da figura 1, como segue:

a) Coeficiente de velocidade específica na ponta da pá ( $\lambda_R$ ) – Relação entre a tangencial e a velocidade de incidência de vento  $V$ ;

$$\lambda_R = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (1)$$

b) Coeficiente de velocidade específica local da pá ( $\lambda_r$ ) – Relação entre a tangencial no ponto de raio  $r$  e a velocidade de incidência de vento  $V$ ;

$$\lambda_r = \frac{\Omega \cdot r}{V} \quad (2)$$

O Ângulo de *Pitch* ( $\beta$ ), que é o ângulo entre a velocidade efetiva e o plano do rotor ( $\beta = \alpha + \vartheta$ ), pode ser também expresso pela equação (3).

$$\beta = \arctan\left(\frac{1}{\lambda_r}\right) \quad (3)$$

E a velocidade efetiva  $C$  que é expressa por  $C = \sqrt{(\Omega r)^2 + V^2}$  pode ser também expressa pela equação 4.

$$C = V \sqrt{1 + \lambda_r^2} \quad (4)$$

### 2.1.2 Potência Eólico-elétrica de um Aerogerador

Segundo Betz há um limite máximo de 59,3% da energia que pode ser extraída do vento. Essa extração máxima irá depender das características aerodinâmicas do rotor, assim como o desenvolvimento de um projeto com certo grau de detalhamento, de modo a ser alcançado valor próximo àquele teórico. A energia eólica é calculada com ajuda da equação 5, em que  $V_2$  representa a velocidade no rotor,  $C_p$  o coeficiente de potência, o que leva à necessidade da modelagem do rotor que possa expressar fielmente estas grandezas.

$$P_{turbina} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v_2^3 \quad (5)$$

De acordo com o teorema de Bernoulli, um fluxo circulando através das superfícies de um corpo com velocidades diferentes provoca modificações de pressão sobre estas superfícies. A figura 2 mostra a distribuição destas pressões ao longo do perfil de um rotor.

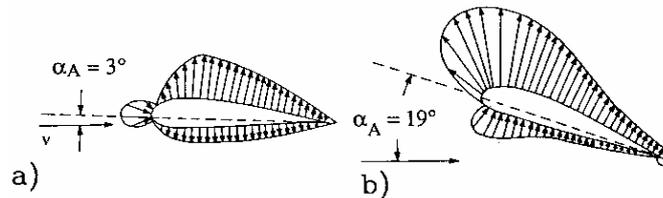


Figura 2 – Distribuição de pressão sobre um perfil para diferentes ângulos de ataque (Gasch, 1993).

A distribuição desta pressão sobre o corpo é diretamente proporcional ao ângulo de incidência da velocidade  $V_1$  do vento. Quando o ângulo de ataque é nulo,  $\alpha_A = 0$ , corresponde somente a uma força de arrasto  $W$ . Ajustando-se o ângulo de ataque  $\alpha_A$  do rotor para um valor diferente de zero, surge uma força de sustentação  $A$ , que é proporcional a superfície do rotor ( $t \cdot b$ ) e cresce com o quadrado da velocidade efetiva  $c$ , que é uma composição vetorial entre a  $V_1$  e a velocidade angular do rotor. As equações 6 e 7 mostram estas relações.

$$A = C_A(\alpha_A) \frac{\rho}{2} c^2 (t \cdot b) \quad (6)$$

$$W = C_W(\alpha_A) \frac{\rho}{2} c^2 (t \cdot b) \quad (7)$$

Os coeficientes de sustentação  $C_A = C_A(\alpha_A)$  e de arrasto  $C_W = C_W(\alpha_A)$ , são dependentes do ângulo de ataque  $\alpha_A$ . Na figura 2, como o perfil da parte superior possui uma superfície mais longa, a corrente de ar sobre este lado do perfil percorre um caminho maior do que o lado inferior do perfil, portanto a velocidade da corrente de ar na parte superior deve ser maior do que na parte inferior. Com isto a pressão no lado superior é menor do que a pressão no lado inferior de acordo com Bernoulli. O somatório ( $p \cdot ds$ ) ao longo do contorno do perfil resulta na força de sustentação  $A$ , perpendicular à direção da velocidade efetiva  $c$  e na força de arrasto  $W$ , no mesmo sentido da velocidade  $c$ .

Desta forma o torque transmitido pelo rotor ao eixo do gerador ( $T = K \cdot d$ ), e conseqüentemente a potência elétrica gerada, é também função do ângulo de *pitch*  $\alpha$ , o que implica a necessidade da inclusão dessa dependência  $C_p = f(\alpha)$  no modelo do rotor.

### 2.1.3 Força Aerodinâmica Sobre uma Pá em Rotação

Na seção de largura  $dr$  com um raio  $r$  de acordo com a figura 3 atuam as forças aerodinâmicas de sustentação  $dA$  e de arrasto  $dW$  (ponto de atuação a um quarto da corda do perfil). A força de sustentação é expressa por:

$$dA = \frac{\rho}{2} c^2 \cdot t \cdot dr \cdot C_A(\alpha_A) \quad (8)$$

e a força de arrasto é expressa por:

$$dW = \frac{\rho}{2} c^2 \cdot t \cdot dr \cdot C_W(\alpha_A) \quad (9)$$

Portanto a força de sustentação tem sua direção perpendicular ao fluxo de ar  $c$ , enquanto a força de arrasto encontra-se na mesma direção do fluxo de ar  $c$ .

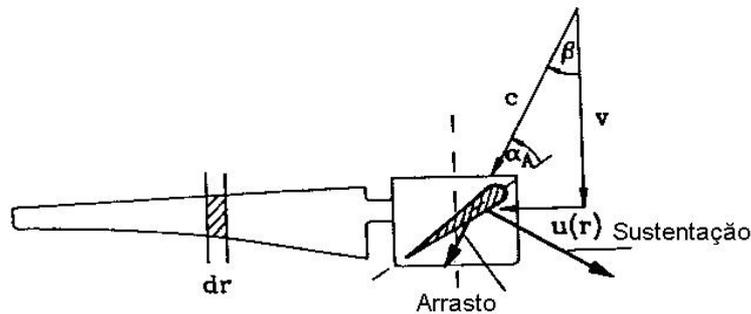


Figura 3 – Força aerodinâmica em uma seção transversal. (Gasch, 1993)

Através da decomposição das forças de sustentação e arrasto na direção tangencial (plano do rotor) e direção axial (direção do vento) obtêm-se as forças nestas duas direções, mostradas nas equações 10 e 11:

Força na direção tangencial:

$$dF_T = \frac{\rho}{2} c^2 \cdot t \cdot dr \cdot (C_A \cos \beta - C_W \sin \beta) \quad (10)$$

Força na direção axial:

$$dF_N = \frac{\rho}{2} c^2 \cdot t \cdot dr \cdot (C_A \sin \beta + C_W \cos \beta) \quad (11)$$

A figura 4 apresenta a decomposição das forças de sustentação e arrasto nas forças normal e tangencial.

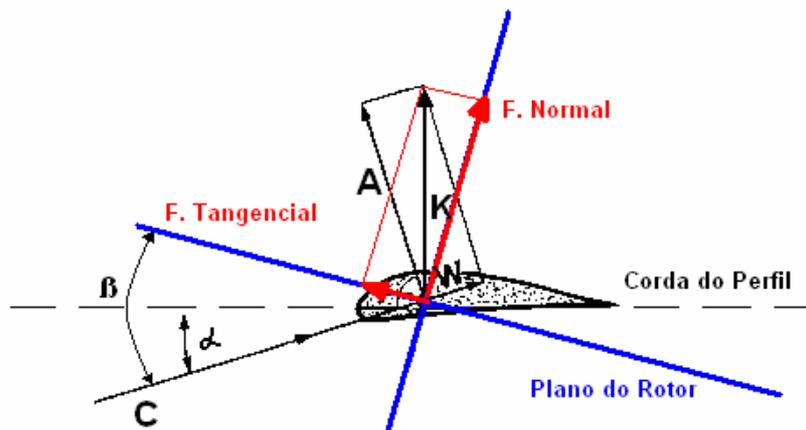


Figura 4 - Forças normal e tangencial sobre uma pá

A força na direção tangencial, que é perpendicular à direção do fluxo de vento é a responsável pela produção do torque motor que irá impulsionar o eixo do gerador, enquanto a força axial (normal ao plano do rotor) será a responsável pelo esforço mecânico de deflexão sobre as pás e, conseqüentemente sobre a estrutura.

### 3.0 - MODELAGEM DO ROTOR DE UM AEROGERADOR

Para desenvolvimento do modelo do rotor da turbina eólica, considera-se que o rotor é indeformável, isto implica que qualquer variação de vento seja integralmente transmitida ao eixo do gerador.

#### 3.1 Processo de Cálculo da Potência Eólica de um Rotor

A potência eólica calculada pela equação 5 pode ser determinada através de um processo iterativo a partir de um perfil aerodinâmico conhecido. Neste processo leva-se em conta a rugosidade do perfil e a perda na ponta da pá, entretanto a perda rotacional devido a transferência de energia das pás ao fluxo de ar à sotavento não é considerada.

Este processo segue os passos desenvolvidos pela teoria de Betz (1926):

1. Inicialmente estima-se um valor para o comportamento da relação da velocidade do vento:  $\zeta^o = V_2/V_1$
2. Calcula-se o coeficiente de velocidade específica local  $\lambda_r = \omega.r/V$
3. Calcula-se o ângulo de *pitch*  $\beta = \arctan(1/\lambda_r)$
4. Calcula-se o ângulo de ataque  $\alpha = \beta + \vartheta$
5. Da curva polar obtêm-se o coeficiente de sustentação  $c_a$
6. Calcula-se um novo valor de  $\zeta^1$
7. Repetem-se os passos de 1 a 6 até que se obtenha uma diferença mínima pré-estabelecida
8. Com os valores de  $\zeta$ ,  $\lambda_r$ ,  $\alpha$ , determina-se:

$C_a, C_w$

$$c = \frac{1}{2} V (1 + \zeta) \sqrt{1 + \lambda_r^2}$$

$$dA = C_a \frac{\rho}{2} .dF .c^2$$

$$dW = C_w \frac{\rho}{2} .dF .c^2$$

$$dT = dA .\sin \beta - dW .\cos \beta$$

$$dN = dA .\cos \beta + dW .\sin \beta$$

$$dM_{rotor} = dT .r$$

$$dP = dM_{rotor} .\omega$$

Este procedimento se encontra organizado em diagrama de blocos conforme apresenta a figura 5

#### 3.2 Diagrama de Blocos do ModleioPotência Eólio-elétrica de um Aero gerador

A figura 5 mostra o fluxograma do processo de modelagem do rotor tendo como base os dados iniciais: registros de velocidades de vento, potência eólio-elétrica, números de pás do rotor, ângulo de ataque ótimo e o perfil do rotor previamente escolhido.

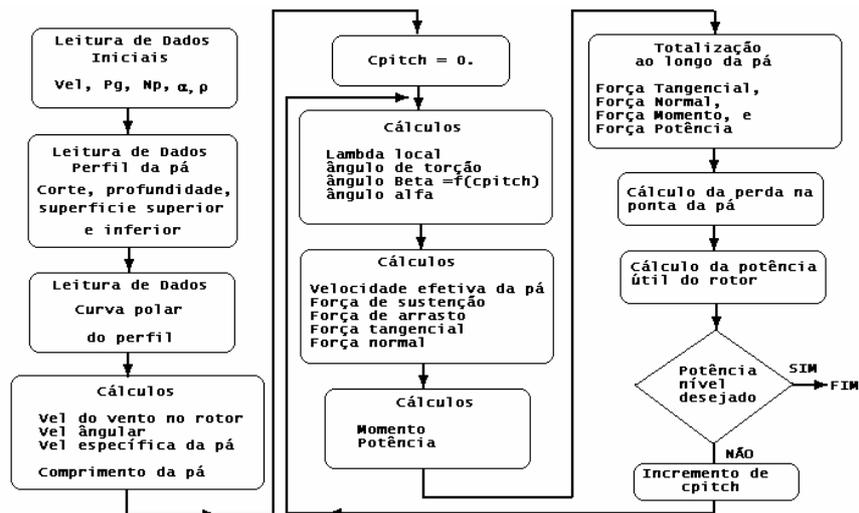


Figura 5 – Fluxograma da Modelagem do rotor e cálculo de potência.

#### 4.0 - RESULTADO

Como forma de exemplificar a aplicação deste modelo, adotou-se um sistema de distribuição primário mostrado na figura 6. A potência nominal da geração eólio-elétrica é de 5 MVA.

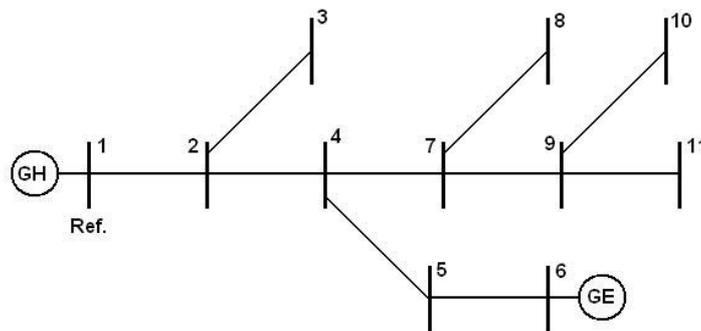


Figura 6. Diagrama unifilar do sistema radial simulado (PERSAUD, 2000).

Os dados de carga e parâmetros deste sistema foram introduzidos no programa de fluxo de carga com modelo da turbina eólica agregado.

A tabela 1 apresenta estes resultados. Vê-se que com a velocidade de vento, o modelo da turbina calcula uma potência eólio-elétrica; esta potência é fornecida ao fluxo de carga que a partir desta potência calcula as tensões nas barras. A tabela 1 mostra especificamente a barra de geração 6.

Tabela 1- Geração eólio-elétrica e tensão na barra 6.

Vento [m/s]	Geração Eólio-elétrica [kW]	Tensão [PU]
3,0	234,31	0,963329
3,5	318,92	0,964392
4,0	416,55	0,965616
4,5	527,20	0,966999
5,0	650,87	0,968538
5,5	787,55	0,970233
6,0	937,25	0,972082
6,5	1099,96	0,974082
7,0	1275,70	0,976232
7,5	1464,45	0,977423
8,0	1666,22	0,978607
8,5	1881,00	0,979858
9,0	2108,81	0,981175

9,5	2349,63	0,982557
10,0	2603,47	0,984001
10,5	2870,32	0,994386
11,0	3150,19	0,994846
11,5	3443,08	0,995323
12,0	3748,99	0,995814
12,5	4067,91	0,996320
13,0	4399,86	1,016825
13,5	4744,82	1,019063

## 5.0 - COMENTÁRIOS

Este modelo foi implementado em linguagem Fortran possibilitando a simulação do aerogerador tanto para operar com o ângulo de máxima potência como a um ângulo qualquer de modo a não gerar violações de tensões nas barras do sistema elétrico.

A característica básica deste modelo é que o mesmo se baseia no projeto do rotor, transferindo para o programa de fluxo de carga a potência eólico-elétrica gerada. As simulações implementadas proporcionaram resultados adequados com convergência dentro dos limites estabelecidos.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) BETZ, ALBERT. (1926). Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Vandenhoeck und Rupprecht, Göttingen, unveränderter Nachdruck der Originalausgabe aus dem Jahre.

(2) GASCH, R.(1993). Windkraftanlagen Grundlagen und Entwurf. 2ªedição. Teubner Stuttgart.

(3) S. PERSAUD; B.FOX; D. FLYNN. Impact of remotely connected wind turbines on steady state operation of radial distribution networks. IEEE Proceeding Generation and Transmission Distribution, Vol. 147, nº 03, may, 2000.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexandre Rocha Filgueiras

Fortaleza, 1955

Graduação: Escola Federal de Itajubá – 1979

Mestrado: Universidade Federal do Ceará – 1997

Engenheiro da Companhia Energética do Ceará até 1987. Atualmente professor da Universidade Federal do Ceará. Especialista em Aerogeradores conectados à rede pelo Instituto Alemão de Energia Eólica – DEWI.

Tadeu da Mata Medeiros Branco

Belém, 1942

Graduação: Universidade /Federal do Pará – 1971

Doutorado: Universidade Estadual de Campinas – 1983

Livre Docência pela Universidade Federal do Pará – 1986.

Professor da Universidade Federal do Pará e consultor da empresa TAMEBRA.

Ailson Pereira de Moura

Mossoró, 1954

Graduação: Universidade Federal do Ceará – 1979

Doutorado: universidade Federal da Paraíba – 1996

Atualmente é Professor Associado I da Universidade Federal do Ceará. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência.