

## **Uma Abordagem para o Projeto de Rotores Eólicos de Pequeno Porte Utilizando Perfis Aerodinâmicos Variados**

**Jerson Rogério Pinheiro Vaz, jerson@ufpa.br<sup>1</sup>**

**João Tavares Pinho, jtpinho@ufpa.br<sup>2</sup>**

**Marcos André Barros Galhardo, galhardo@ufpa.br<sup>2</sup>**

**Dimitri Oliveira e Silva, dimitri.silva@itec.ufpa.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará – Faculdade de Engenharia Mecânica  
Av. Augusto Correa, s/n - Belém, PA, Brasil – 66075-900

<sup>2</sup>Universidade Federal do Pará – Faculdade de Engenharia Elétrica  
Av. Augusto Correa, s/n - Belém, PA, Brasil – 66075-900

**Resumo:** *O presente trabalho descreve o projeto de rotores eólicos de pequeno porte com múltiplos perfis aerodinâmicos condicionados a baixas velocidades de vento, típicas de regiões isoladas da Amazônia, o que justifica o desenvolvimento de tecnologias de alto desempenho dadas as condições mencionadas. Para tanto, o trabalho apresenta uma técnica para o projeto de uma turbina eólica, que utiliza uma combinação de perfis aerodinâmicos ao longo da pá, com o objetivo de atingir bom aproveitamento em baixas velocidades de vento. As curvas do coeficiente de potência em função da velocidade apresentam características de um rotor com um maior ganho de energia do vento, confirmando o melhor desempenho esperado do sistema.*

**Palavras-chave:** *Aerodinâmica, Perfis aerodinâmicos, Rotores eólicos, Aerogeradores*

### **1. INTRODUÇÃO**

O modelo matemático utilizado neste trabalho apresenta como base o Método do Momento do Elemento de Pá (do Inglês: *Blade Element Momentum* - BEM), com as correções estabelecidas por Prandtl (Hansen, 2008), que considera no sistema de vórtice gerado pelo rotor um número finito de pás, e por Glauert (1935), o qual desenvolveu uma relação empírica para corrigir o fator de indução axial, quando este atinge valores maiores que 0,4, visto que, o método falha para tais valores. Sendo assim, a modelagem com múltiplos perfis divide-se em duas partes. A primeira, trata da obtenção do rotor eólico, considerando o método BEM, com as correções de Prandtl e Glauert associadas à otimização da distribuição de corda e do ângulo de montagem, que são clássicos na literatura e podem ser encontrados em detalhe no trabalho de Mesquita, Silva e Quintana (1994). A segunda parte apresenta o estudo da eficiência do rotor, que é aplicado em cada estação da pá, para um dado tipo de perfil aerodinâmico. Para a construção do rotor, utiliza-se o modelo descrito no presente trabalho apenas para dois perfis: NACA64<sub>4</sub>-421 e FX63137 (Vaz *et al*, 2009 e Abbot and Doenhoff, 1959).

### **2. PROCEDIMENTO PARA A ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO ROTOR EÓLICO**

A análise da eficiência do rotor com múltiplos perfis utiliza o método BEM como base, devido a sua simplicidade e ao baixo custo computacional (Alves, 1997, Mesquita and Alves, 2000). Neste caso, a equação (1) determina o ângulo de escoamento  $\phi$  entre o plano do rotor e a velocidade relativa.

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{(1-a)}{(1+a')} \frac{V_0}{\Omega r} \quad (1)$$

O ângulo de ataque é obtido da expressão (2).

$$\alpha = \phi - \beta \quad (2)$$

Uma vez conhecido o ângulo de ataque, obtêm-se,  $C_d$  e  $C_l$ , cujos valores são tabelados, e  $C_N$  e  $C_T$  das equações (3) e (4).

$$C_N = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (3)$$

$$C_T = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (4)$$

Para o cálculo dos fatores de indução axial no plano do rotor  $a$  e na esteira  $a'$ , tem-se:

$$a = \frac{1}{\left( \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_N} + 1 \right)} \quad (5)$$

$$a' = \frac{1}{\left( \frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_T} - 1 \right)} \quad (6)$$

onde  $F$  é a correção de Prandtl. (Hansen, 2008)

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} (e^{-t}) \quad (7)$$

e

$$f = \frac{B}{2} \cdot \frac{(R - r)}{r \sin \phi} \quad (8)$$

sendo  $B$  o número de pás,  $R$  é o raio do rotor,  $r$  é o raio local.

A solidez de uma seção  $\sigma$  é definida como a fração da área anular no volume de controle que é varrida pelas pás, estabelecida pela equação (9).

$$\sigma(r) = \frac{c(r) B}{2\pi r} \quad (9)$$

Para altos valores do fator de indução axial no plano do rotor, utiliza-se a correção de Glauert dada por (Hansen, 2008):

$$\text{Se } a \leq a_c$$

$$a = \frac{1}{\left( \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_N} + 1 \right)} \quad (10)$$

que é a própria equação (5).

$$\text{Se } a > a_c$$

$$a = \frac{1}{2} \left[ 2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \quad (11)$$

onde

$$K = \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_N} \quad (12)$$

Para a utilização de vários perfis aerodinâmicos na pá, conhecendo  $r$ ,  $c(r)$ ,  $\beta(r)$ ,  $C_l(\alpha_i)$ ,  $C_d(\alpha_i)$  e  $V_0$  aplica-se o seguinte procedimento:

Passo	Procedimento
1	Arbitram-se valores para $a_1$ e $a_1^i$ . No presente trabalho $a_1 = 0$ e $a_1^i = 0,3$ Para $i$ variando de 1 a $nk$ Se $i \leq n_1$
2	Calcula-se o ângulo $\phi_i$ na equação (1)
3	Calcula-se o ângulo de ataque local $\alpha_i = \phi_i - \beta_i$ na equação (2).
4	Lêem-se $C_l(\alpha_i)$ e $C_d(\alpha_i)$ de uma tabela.
5	Calculam-se $C_N^i$ e $C_T^i$ das equações (3) e (4).
6	Calculam-se os novos valores de $a_i$ e $a_i^i$ utilizando o esquema de Glauert estabelecido pelas equações (6), (10) e (11).
7	Se $a_i$ e $a_i^i$ tem variação maior que uma dada tolerância retorna-se ao passo 2, se não, termina-se o processo. Se $n_1 < i \leq n_2$ Repetem-se os passos 2, 3, 4, 5, 6 e 7. . . . Se $n_{k-1} < i \leq n_k$ Repetem-se os passos 2, 3, 4, 5, 6 e 7.
8	Fim do laço em $i$ Determina-se a eficiência do rotor.

$n_1, n_2, \dots, n_k$  são as estações correspondentes aos intervalos referentes a cada perfil aerodinâmico,  $n_k$  é o número de estações ao longo da pá, e o índice  $k$  representa o número de perfis. Com as informações geométricas do rotor, distribuição de corda  $c(r)$ , ângulo de montagem  $\beta(r)$  e dos parâmetros aerodinâmicos, implementam-se outros perfis em posições pré-estabelecidas ao longo do raio do rotor (Figura 1). Daí a necessidade de um estudo preliminar dos perfis adequados a uma determinada condição de vento.

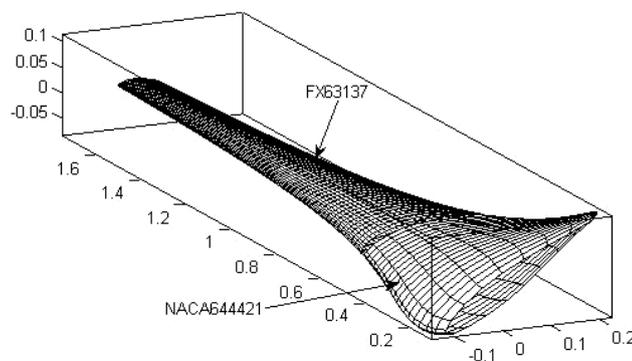


Figura 1 – Modelo em 3D de uma pá com dois perfis.

Para o esquema de construção da pá, divide-se o raio  $R$  em tamanhos discretos e iguais a  $\Delta r$ , de tal maneira que cada passo no raio,  $r_i = r_0 + (i-1)\Delta r$ , seja correspondente a uma estação da pá (Figura 2). Cada estação tem que ser limitada pela curva correspondente às coordenadas do perfil utilizado. Neste caso, utilizam-se os perfis NACA64-421 e FX63137 mostrados separadamente na Figura 3 e em corte da pá na Figura 4.

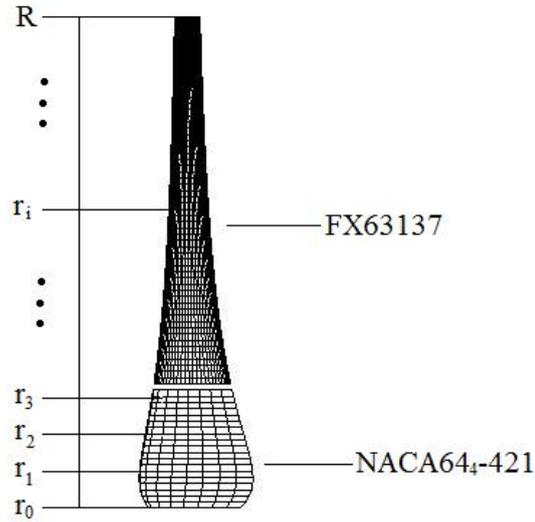


Figura 2 – Pá seccionada por planos ao longo da direção do raio. Modelo de construção da geometria da pá.

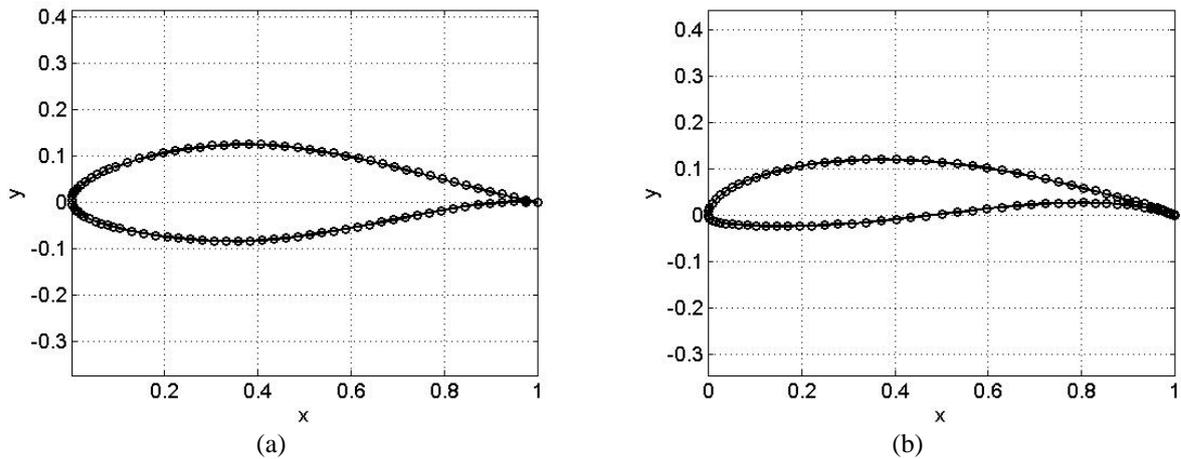


Figura 3: (a) Perfil NACA644-421; (b) Perfil FX63137.

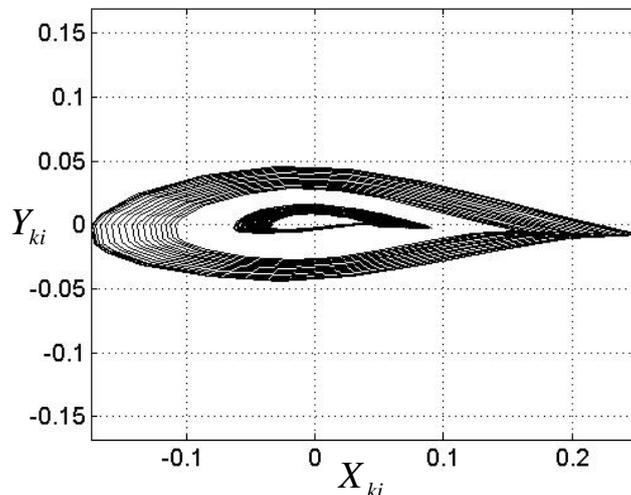


Figura 4 – Perfis aerodinâmicos NACA644-421 e FX63137 com corte transversal da pá.

Após seccionar a pá em intervalos iguais, gera-se a superfície que une todos os planos ao longo do raio.

Para estabelecer o modelo matemático é necessário definir os parâmetros:

$$X_{ki} = Rc_k x_i \quad (13)$$

$$Y_{kj} = Rc_k \bar{y}_j \quad (14)$$

$$\text{com } \begin{cases} i, j = 1, 2, 3, \dots, n \\ k = 1, 2, 3, \dots, m \end{cases}$$

em que  $n$  corresponde ao número de pontos do perfil aerodinâmico, e  $m$  ao número de estações na pá,  $R$  é o raio do rotor,  $c_k$  é a corda em cada estação da pá e  $x_i$  e  $y_j$  são as coordenadas do perfil aerodinâmico. As grandezas  $X_{ki}$  e  $Y_{kj}$  carregam as informações sobre as coordenadas reais do perfil em cada estação nos eixos de referência  $x$  e  $y$ , respectivamente.

A torção na pá, estabelecida através do ângulo de montagem, é calculada a partir do modelo aqui utilizado e definida por  $\beta_i$ . Desta forma, a implementação da torção na pá (Figura 5) é desenvolvida a partir da matriz de rotação dada por:

$$\begin{pmatrix} \cos(\beta_i) & -\sin(\beta_i) \\ \sin(\beta_i) & \cos(\beta_i) \end{pmatrix} \quad (15)$$

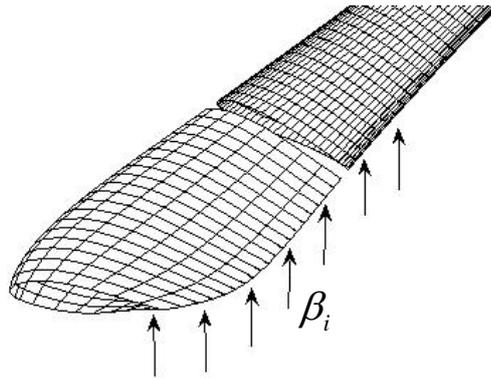


Figura 5 – Torção na pá, definida por  $\beta_i$

Aplicando-se a rotação nas grandezas  $X_{ki}$  e  $Y_{kj}$  é obtida a transformação das coordenadas do perfil aerodinâmico, resultando nos parâmetros rotacionados  $\tilde{X}_{ki}$  e  $\tilde{Y}_{kj}$ .

$$\begin{pmatrix} \tilde{X}_{ki} \\ \tilde{Y}_{kj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta_i) & -\sin(\beta_i) \\ \sin(\beta_i) & \cos(\beta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{ki} \\ Y_{kj} \end{pmatrix} \quad (16)$$

A função  $\tilde{f}_{kk}$  que gera a superfície aerodinâmica da pá (Figura 6) é definida fazendo

$$\tilde{f}_{kk} = \sqrt{(\tilde{X}_{ki})^2 + (\tilde{Y}_{kj})^2} \quad (17)$$

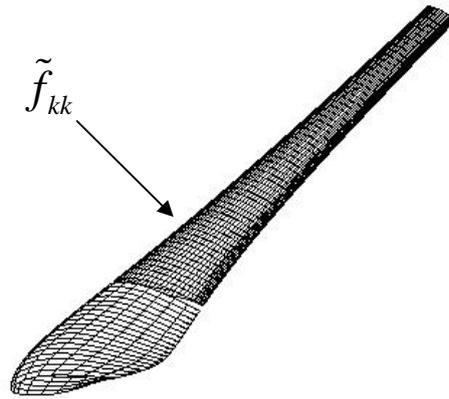


Figura 6 – Superfície aerodinâmica da pá eólica com torção.

### 3. RESULTADOS DO MODELO

Os resultados apresentados neste trabalho correspondem ao estudo de um rotor eólico misto com dois perfis aerodinâmicos: NACA64<sub>4</sub>-421 e FX63137. A escolha dos perfis foi baseada na simulação desenvolvida por Vaz *et al.* (2009), que relaciona o coeficiente de potência com o ângulo de ataque ótimo para uma velocidade média de vento de 3 m/s. Tal velocidade é justificada devido à ocorrência de baixas velocidades de vento na região do estado do Pará (Frade e Pinho, 2000). O NACA64<sub>4</sub>-421 é utilizado sempre da raiz para a ponta da pá e o FX63137 posteriormente. Para o perfil NACA64<sub>4</sub>-421, tem-se uma razão de velocidade (*Tip-Speed-Ratio* - TSR) de 8,02, velocidade média de vento 2,97 m/s e um coeficiente de potência máximo de 0,46. Para o perfil FX63137, uma razão de velocidade 7,31, velocidade média de vento 3,26 m/s e um coeficiente de potência máximo de 0,40. Os resultados são apresentados com mudança do perfil ao longo da pá em três posições 25, 50 e 75% do raio, da raiz para a ponta no rotor. Todas as simulações consideram um cubo com raio de 0,15 m e rotor com raio de 1,75 m. No caso do rotor com os dois perfis citados anteriormente, a Figura 7 mostra uma razão de velocidade de 6,42, velocidade média correspondente de 3,71 m/s e um coeficiente de potência máximo de 0,40. A simulação considera a mudança de perfil aerodinâmico em 25% do raio da pá.

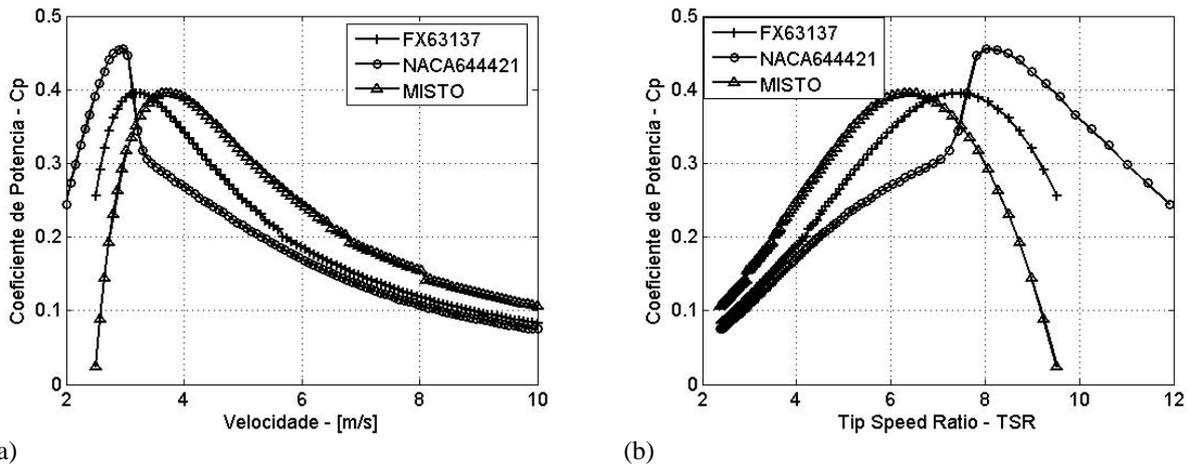


Figura 7 – (a) Perfil do coeficiente de potência em relação à velocidade média; (b) Perfil do coeficiente de potência em relação TSR. Mudança de perfil aerodinâmico em 25% do raio da pá.

A Figura 8 mostra uma razão de velocidade de 6,42, velocidade média correspondente de 3,71 m/s e um coeficiente de potência máximo de 0,38. A simulação considera a mudança de perfil aerodinâmico em 50% do raio da pá.

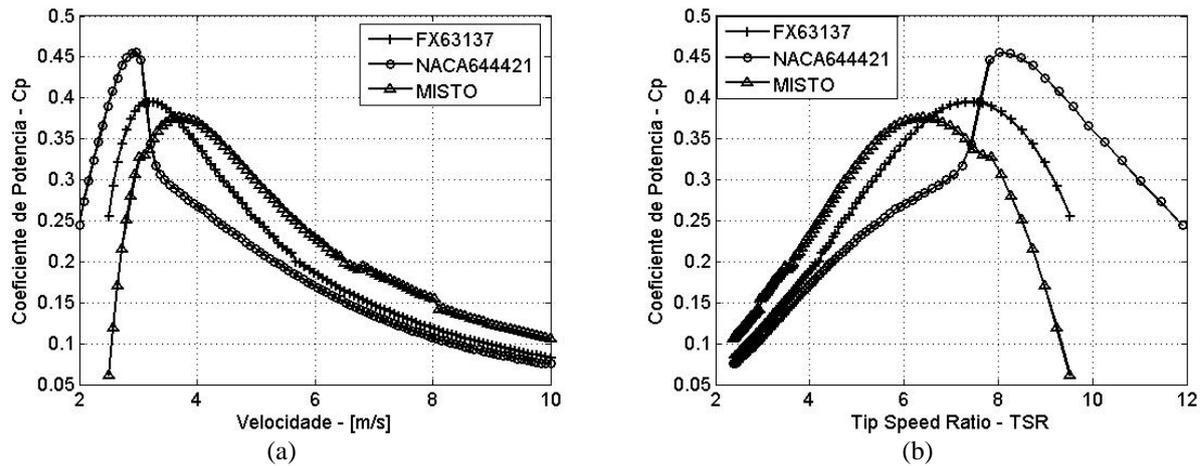


Figura 8 – (a) Perfil do coeficiente de potência em relação à velocidade média; (b) Perfil do coeficiente de potência em relação à TSR. Mudança de perfil aerodinâmico em 50% do raio da pá.

A Figura 9 mostra uma razão de velocidade de 7,86, velocidade média correspondente de 3,03 m/s e um coeficiente de potência máximo de 0,36. A simulação considera a mudança de perfil aerodinâmico em 75% do raio. Neste caso, entretanto, é fácil observar que o rotor apresenta forte queda na eficiência, além de uma instabilidade, devido, principalmente, à transição entre os perfis, quando comparado com os casos anteriores. Tal instabilidade, deve-se a fortes variações nos fatores de indução, ocasionadas pela influência da esteira do rotor quando a transição entre os diferentes perfis ocorre próximo à extremidade da pá.

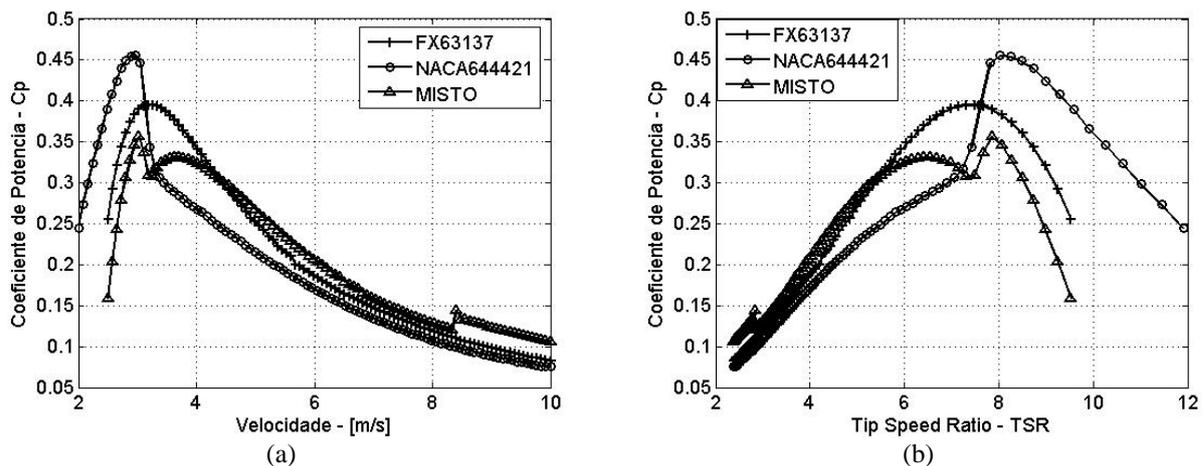


Figura 9 – (a) Perfil do coeficiente de potência em relação à velocidade média; (b) Perfil do coeficiente de potência em relação à TSR. Mudança de perfil aerodinâmico em 75% do raio da pá.

#### 4. CONCLUSÕES

Quanto à posição de mudança do perfil, a Figura 7 (25% do raio da pá) apresenta melhor eficiência. Apesar do perfil NACA64<sub>4</sub>-421 apresentar maior rendimento para baixas velocidades, o mesmo decai rapidamente a partir de 3,5 m/s em qualquer dos resultados. O perfil FX63137 apresenta igual rendimento quando comparado com o misto; entretanto, decai também rapidamente a partir de 4,5 m/s. Desta forma, o maior ganho de energia, ocorre para o rotor com duplo perfil aerodinâmico, que apresenta bom rendimento para uma faixa maior de velocidades. Observa-se que o perfil da Figura 1 está deslocado, possibilitando maior geração de energia na faixa de velocidades que vai de 2,5 a 9 m/s. Tais resultados mostram que o projeto de rotores eólicos de pequeno porte com perfis aerodinâmicos variados apresenta bom desempenho, principalmente para faixas de velocidades de 3 a 9 m/s.

#### 5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas – GEDAE, membro sede do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia – INCT – EREEA, como parte de um projeto financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

## 6. REFERÊNCIAS

- Vaz, J. R. P., Silva, D. O., Pinho, J. T., Branco, T. M. M., Mesquita, A. A. (2009). Estudo da Eficiência de Perfis Aerodinâmicos Aplicados a Aerogeradores de Pequeno Porte, III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Belém, Pará, Brasil.
- Vaz, J. R. P., Silva, D. O., Mesquita, A. A., Lins, E. F. and Pinho, J. T. (2009). Aerodynamic and Modal Analyses of Blades for Small Wind Turbines, 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, Rio Grande do Sul, Brazil.
- Mesquita, A. A., Vaz, J. R. P., Silva, D. O., Lins, E. F. e Pinho, J. T. (2009). Análise Modal Numérica de Pá de Turbinas Eólicas de Pequeno Porte para a Amazônia, The 8th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2009, Ubatuba, São Paulo, Brasil.
- Frade, L. C. S. e J. T. Pinho. (2000). Levantamento, Tratamento e Análise de Dados de Velocidade e Direção do Vento no Litoral do Estado do Pará, Relatório Técnico, GEDAE-UFPA/ELETRONORTE, ago.
- Frade, L. C. S. e J. T. Pinho. (2002). Wind Potential on the Coast of the State of Pará/Brazil. IEEE-PES T&D Latin America, São Paulo.
- Frade, L. C. S. (2000). Estudo da Potencialidade de Energia Eólica no Litoral do Estado do Pará, Dissertação de Mestrado, PPGEE/Universidade Federal do Pará, Belém.
- Amarante, O. A. C., Brower, M., Zach, J. e Sá, A. L. (2001). Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicação realizada pela Camargo Schubert e Truwind Solutions com suporte técnico e financeiro do MME – ELETROBRÁS – CEPEL – CRESESB.
- Mesquita, A. L. A., Silva, O. F. e Quintana, F. L. P. (1994). Uma Metodologia para Projeto de Rotores Eólicos de Eixo Horizontal, III Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Belém, Pará, Brasil.
- Mesquita, A. L. A. and Alves, A. S. G. (2000). An Improved Approach for Performance Prediction of HAWT Using Strip Theory, Wind Engineering, Vol. 24, No. 6.
- Alves, A. S. G. (1997). Análise do Desempenho de Rotores Eólicos de Eixo Horizontal, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Brasil.
- Glauert, H. (1935). AirPlane Propellers, in Aerodynamic Theory, Spring Verlag, ed. W. F. Durand, pp. 169-360.
- Eggleston, D. M. and Stoddard, F. S. (1987). Wind Turbine Engineering Design, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Abbot, J. H. and Doenhoff, V. (1959). Theory of Wing Suctions, Dover Publications Inc, 2nd. Edition.
- Hansen, M. (2008). Aerodynamics of Wind Turbines, 2nd Edition, Earthscan.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

### **A Methodology to the Small Wind Rotors Design Using Multiples Airfoils**

**Jerson Rogério Pinheiro Vaz, jerson@ufpa.br<sup>1</sup>**

**João Tavares Pinho, jtpinho@ufpa.br<sup>2</sup>**

**Marcos André Barros Galhardo, galhardo@ufpa.br<sup>2</sup>**

**Dimitri Oliveira e Silva, dimitri.silva@itec.ufpa.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Federal University of Pará– Faculty of Mechanical Engineering  
Av. Augusto Correa, s/n - Belém, PA, Brazil – 66075-900

<sup>2</sup> Federal University of Pará – Faculty of Electrical Engineering  
Av. Augusto Correa, s/n - Belém, PA, Brazil – 66075-900

**Abstract:** *This paper describes the small wind turbine design with multiple aerodynamics profiles conditioned at low wind speeds, typical of remote regions of Amazonia, which justifies the development of high-performance technologies given the conditions mentioned. For this, the paper presents a technique for the wind turbine design, which uses a combination of aerodynamics profiles along of blade, aiming to achieve good performance in low wind speeds. The power coefficient curves as a function of the wind speed presented characteristics of the rotor with a larger gain in wind energy, confirming the improved performance.*

**Keywords:** *Aerodynamics, Aerodynamics Profiles, Wind Rotors, Wind Turbines.*