

ANÁLISE DE PERFORMANCE DE TURBINAS EÓLICAS COM DIFUSOR E PÁS CURVADAS

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE AEROGENERADORES CON DIFUSOR Y PALA CURVA

PERFORMANCE ANALYSIS OF WIND TURBINES WITH DIFFUSER AND SWEEP BLADES

Jean C. A. Nobre; David L. P. Sousa; Jerson R. P. Vaz; Silvio B. Vale.
Faculdade de Ciência e Tecnologia. Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA – Brasil.

jean.nobre@ananindeua.ufpa.br
david.sousa@ananindeua.ufpa.br
jerson@ufpa.br
bispo@ufpa.br

Resumo

Este trabalho apresenta uma nova análise de performance de turbinas eólicas aumentadas por difusor (DAWT) e pás curvadas (efeito *sweep*), considerando a influência da eficiência do difusor e do empuxo, na qual é utilizada uma formulação para a velocidade do escoamento na esteira proposta por Vaz & Wood (2018). A teoria do elemento de pá foi estendida para incluir a eficiência do difusor na formulação da velocidade axial que, por sua vez, modifica o empuxo e a potência. É adicionada também uma correção para o empuxo sobre o rotor proposta por Vaz & Wood (2016), em que é utilizada uma equação quadrática para incorporar as perdas no difusor. Foi desenvolvido e implementado um algoritmo para avaliar a performance de turbinas eólicas com difusor e efeito *sweep* com base na Teoria do *Momentum* do Elemento de Pá (BEMT). O impacto do difusor é avaliado pelo fator de aumento, a razão entre a eficiência da turbina e o limite de Betz-Joukowski. A comparação entre o experimento e o algoritmo leva em consideração o mesmo rotor e difusor utilizado por Hoopen (2009), otimizando apenas a pá onde é inserido o efeito *sweep*. O modelo foi validado em comparação com dados experimentais de Hoopen (2009) e mostra boa concordância com os resultados de potência, torque e empuxo para uma velocidade de 10,0 m/s, o fator de aumento demonstra boa concordância para velocidades de 7,0; 9,0; 10,0 e 11,0 m/s. Os resultados obtidos experimentalmente por Hoopen (2009) são: potência de 531,0 W, torque de 7,10 N.m e coeficiente de empuxo de 0,80. Os resultados obtidos no trabalho atual com a pá reta, são: potência de 532,6 W, torque de 7,10 N.m e coeficiente de empuxo de 0,77. Os rotores otimizados com o efeito *sweep* de 30° e 40° geraram a maior performance no DAWT. O rotor com efeito *sweep* de 30° gerou uma potência de 542,3 W, torque de 7,23 N.m e um coeficiente de empuxo de 0,69. O rotor com o efeito *sweep* de 40° gerou uma potência de 520,37 W, torque de 6,94 N.m e um coeficiente de empuxo de 0,60. O presente trabalho é relevante para o atual estado da arte, pois, o modelo teórico utilizado apresentou resultados satisfatórios, demonstrando a viabilidade do uso de algoritmos para análise de projetos de turbinas eólicas com difusor e efeito *sweep*.

Palavras-chave: Turbinas eólicas; Difusor; Pás curvadas; Otimização de rotores; BEMT.

Cómo citar: Nobre, J. C. A., Sousa, D. L. P., Vaz, J. R. P., & Vale, B. S. ANÁLISE DE PERFORMANCE DE TURBINAS EÓLICAS COM DIFUSOR E PÁS CURVADAS. *Fuentes, el reventón energético*, 22(1), 99-107. <https://doi.org/10.18273/revfue.v22n1-2024007> 

Resumen

Este trabajo presenta un nuevo análisis de desempeño de aerogeneradores aumentado con difusor (DAWT) y palas curvas (efecto barrido), considerando la influencia de la eficiencia del difusor y el empuje, en el que se presenta una formulación para la velocidad de estela propuesta por Vaz & Wood (2018). La teoría del elemento de pala se ha ampliado para incluir la eficiencia del difusor en la formulación de la velocidad axial de Vaz & Wood (2018), que a su vez modifica el empuje y la potencia. También se agrega una corrección por el empuje sobre el rotor propuesta por Vaz & Wood (2016), en la que se utiliza una ecuación cuadrática para incorporar las pérdidas en el difusor. Se desarrolló e implementó un algoritmo para evaluar el desempeño de aerogeneradores con efecto difusor y barrido basado en la Teoría del Momento del Elemento de Pala (BEMT). El impacto del difusor se evalúa mediante el factor de aumento, la relación entre la eficiencia de la turbina y el límite de Betz. El impacto del difusor se evalúa mediante el factor de impulso, la relación entre la eficiencia de la turbina y el límite de Betz-Joukowski. La comparación entre el experimento y el algoritmo tiene en cuenta el mismo rotor y difusor utilizado por Hoopen (2009), optimizando sólo la pala donde se inserta el efecto de barrido. El modelo fue validado en comparación con datos experimentales de Hoopen (2009) y muestra una buena concordancia con los resultados de potencia, torsión y empuje para una velocidad de 10,0 m/s, el factor de aumento demuestra una buena concordancia para velocidades de 7,0 m/s; 9,0; 10,0 y 11,0 m/s. Los resultados obtenidos experimentalmente por Hoopen (2009) son: potencia de 531,0 W, torsión de 7,10 N.m y coeficiente de empuje de 0,80. Los resultados obtenidos del trabajo con una pala recta: potencia de 532,6 W, torsión de 7,10 N.m y coeficiente de empuje de 0,77. Los rotores optimizados con efecto de barrido de 30° y 40° generaron un mayor desempeño en el DAWT. El rotor con efecto barrido de 30° generó una potencia de 542,3 W, un torsión de 7,23 N.m y un coeficiente de empuje de 0,69. El rotor con efecto barrido de 40° generó una potencia de 520,37 W, un torsión de 6,94 N.m y un coeficiente de empuje de 0,60. El presente trabajo es relevante para el estado actual del arte, ya que el modelo teórico utilizado presentó resultados satisfactorios, demostrando la factibilidad de utilizar algoritmos para el análisis de diseños de aerogeneradores con efecto difusor y barrido.

Palabras clave: Turbinas de viento; Difusor; Palas curvas; Optimización de rotores; BEMT.

Abstract

This work presents a new performance analysis of diffuser-augmented wind turbine (DAWT) and curved blades (sweep effect), considering the influence of diffuser efficiency and thrust, in which a formulation for wake flow speed proposed by Vaz & Wood (2018). Blade element theory has been extended to include diffuser efficiency in the axial velocity formulation by Vaz & Wood (2018), which in turn modifies thrust and power. A correction for the thrust on the rotor proposed by Vaz & Wood (2016) is also added, in which a quadratic equation is used to incorporate the losses in the diffuser. An algorithm was developed and implemented to evaluate the performance of wind turbines with diffuser and sweep effect based on the Blade Element Momentum Theory (BEMT). The impact of the diffuser is evaluated by the augmentation factor, the ratio between the turbine efficiency and the Betz-Joukowski limit. The comparison between the experiment and the algorithm takes into account the same rotor and diffuser used by Hoopen (2009), optimizing only the blade where it is inserted the sweep effect. The model was validated in comparison with experimental data from Hoopen (2009) and shows good agreement with the power, torque and thrust results for a speed of 10.0 m/s, the increase factor demonstrates good agreement for speeds of 7.0 m/s; 9.0; 10.0 and 11.0 m/s. The results obtained experimentally by Hoopen (2009) are: power of 531.0 W, torque of 7.10 N.m and thrust coefficient of 0.80. The results obtained from the work with a straight blade are: power of 532.6 W, torque of 7.10 N.m and thrust coefficient of 0.77. The optimized rotors with the 30° and 40° sweep effect generated greater performance in the DAWT. The rotor with the 30° sweep effect generated a power of 542.3 W, torque of 6.94 N.m and a thrust coefficient of 0.60. The rotor with the 40° sweep effect generated a power of 520.37 W, torque of 7.23 N.m and a thrust coefficient of 0.69. The present work shows relevant points for the current state of the art, as the theoretical model used presented satisfactory outcomes, demonstrating the feasibility of algorithms for analyzing wind turbine designs with diffuser and sweep effect.

Keywords: Wind turbines; Diffuser; Swept blades; Rotor optimization; BEMT.

INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, a energia dos ventos tem sido aproveitada, seja para impulsionar embarcações a vela ou para rotacionar as pás de moinhos de vento (CRESESB, 2017). Estima-se que, antes da invenção do cata-vento, a Pérsia, a China (2000 A.C.) e o Império Babilônico (1700 A.C.) também utilizavam

cata-ventos rústicos para irrigação. Figura 1 mostra um moinho de vento em Amsterdam implantado em 1847 (à esquerda) e um cata-vento construído em 2001 por William Kamkwamba em Kasungu no Malawi (à direita).



Figura 1. Cata-ventos. (Energia Inteligente, 2024).

A utilização de fontes de energias renováveis torna-se cada vez mais necessária para que nosso planeta não entre em colapso com as alterações humanas e que gerações futuras tenham um ambiente “estável”. A principal razão para a implantação e evolução da energia eólica é a baixa interferência no meio ambiente. Conforme Gemaque (2022), na literatura não é comum encontrar o efeito sweep como variável de projeto. A grande maioria dos trabalhos publicados é baseada em turbinas com pás retas (Lopes et al., 2015).

O efeito sweep é a curvatura da pá na direção tangencial, sendo caracterizado como sweep para trás, quando as pás são curvadas na direção oposta à rotação, como mostrado na Figura 2 Este efeito tem importantes benefícios no projeto de turbinas de eixo axial, como apresentado por Kim e Murcia (2017), que constataram em suas análises que o efeito sweep pode gerar alívio de carga aerodinâmica no rotor.

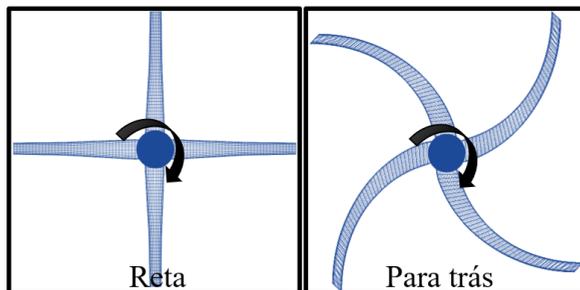


Figura 2. Efeito sweep no rotor. (Autores, 2024).

Khalafallah et al. (2019), Huang et al. (2022), Dias & Camacho (2022) e Veloso et al. (2023) analisaram turbinas eólicas com efeito sweep. De acordo com Dias & Camacho (2022) o efeito sweep aumenta a eficiência de uma turbina eólica devido o escoamento apresentar maior vorticidade na pá reta e menor vorticidade na pá com efeito sweep, assim, conclui-se que ocorre uma perda de energia na pá reta e um maior aproveitamento de energia na pá com efeito sweep.

Glauert (1935) desenvolveu a teoria do *momentum* do elemento de pá (BEMT) que é a junção da teoria do momento axial com a teoria do elemento de pá para prever o desempenho de uma turbina eólica por meio de análise dos elementos radiais da pá.

De Souza Alvez et al. (2023), Martínez-Hernández et al. (2022) e Restrepo-Linarez (2023) realizaram estudos sobre turbinas eólicas desde a utilização de softwares, otimizações estruturais e políticas públicas para a implementação de turbinas, mostrando que um sistema eólico e sua aplicação necessitam da cooperação de diversos fatores da sociedade atual.

O estudo é baseado em uma análise semi-empírica unidimensional. Logo, objetiva-se analisar a performance de um DAWT com pás retas e pás curvadas para trás com o BEMT. Utilizando uma aproximação para a correção de alto empuxo de Vaz & Wood (2016), bem como uma formulação geral para a velocidade da esteira distante proposta por Vaz & Wood (2018). Na literatura há poucos trabalhos analisando turbinas eólicas com o efeito sweep. Também há poucos trabalhos considerando a eficiência e o coeficiente de empuxo do difusor em análises por algoritmo (Barbosa et al., 2015). Portanto, o presente trabalho se torna importante para o atual estado da arte, além disso, os autores desconhecem outro trabalho de análise de performance sobre DAWT com efeito sweep.

METODOLOGIA

A principal análise deste trabalho é a comparação dos resultados obtidos de potência, torque e fator de aumento (A_f) com resultados experimentais disponibilizados por Hoopen (2009).

O DAWT analisado por Hoopen (2009) foi projetado pela *National Aerospace Laboratory* (NLR). O difusor é um aerofólio circular com uma razão de área igual a 0,578, a entrada do difusor tem um diâmetro aproximado de 1,52 m e a saída tem 2 m. Hoopen (2009) analisou diferentes configurações de difusores: com *flap* de Gurney de 0,04 m e sem geradores de vórtices; sem *flap* de Gurney e com 37 geradores de vórtices de 0,11 m; sem *flap* de Gurney e sem geradores de vórtices (configuração simples).

O DAWT com *flap* de Gurney é experimentado para uma velocidade de escoamento não perturbada de 10 m/s e uma rotação de aproximadamente 716,2 rpm. Para o A_f Hoopen (2009) expressa resultados entre velocidades de 2,5 e 15 m/s. O trabalho atual utiliza o DAWT com 37 GVs para a comparação experimental. A Tabela 1 mostra os dados do DAWT, a Figura 3 mostra o difusor.

Tabela 1. Dados de projeto do DAWT.

| DAWT | Dados |
|-------------------------------|-----------------------|
| Diâmetro do Rotor (Hoopen) | 1,50 m |
| Diâmetro do Cubo | 0,3 m |
| Número de Pás | 3 |
| Difusor | NRL |
| Razão de Área do Difusor | 0,578 |
| Eficiência do Difusor Adotada | 0,80 |
| Aerofólio da Pá | NACA 2207 |
| Comprimento Total da Pá | 0,7457 m |
| Espessura Máxima da Pá | 0,007 m |
| Comprimento Máximo da corda | 0,093 m |
| Ângulo de Torção Máximo da Pá | 0,48 rad |
| Densidade do Ar (20 °C) | 1,2 kg/m ³ |
| Velocidade do Vento | 10 m/s |
| Velocidade de Rotação | 716,2 rpm |
| C_{Td} com 37 GV's | 0,1489 |

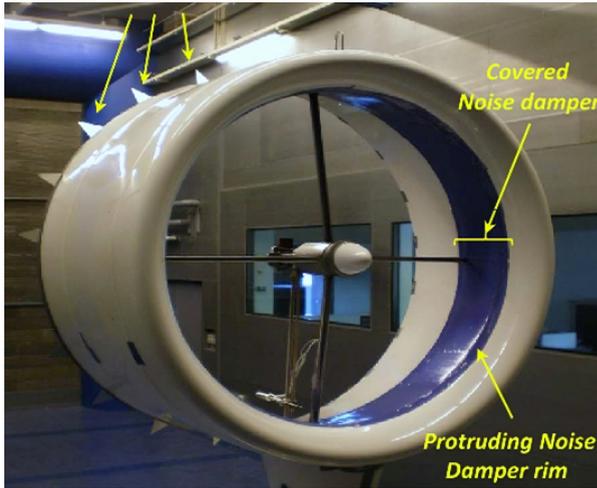


Figura 3. Difusor experimentado (Hoopen, 2009).

O algoritmo utiliza os seguintes dados de entrada: raio (r), corda (c) e ângulo de torção (θ) de cada elemento de pá; eficiência do difusor (η_d); razão de área do difusor (β); coeficiente de empuxo (C_{Td}); rotação (Ω); coeficientes de sustentação ($C_l(\alpha)$) e arrasto ($C_d(\alpha)$) ambos em função do ângulo de ataque e velocidade (V_0).

Modelo matemático

Abaixo é expresso de forma simplificada as teorias e correções utilizadas no trabalho atual.

Teoria do momento axial com difusor

Conforme relatado em Vaz & Wood (2016), a teoria do momento axial considera o ar sem atrito e ignora o componente da velocidade de rotação. Para modelar um difusor com perdas, é necessária uma abordagem semelhante à usada para determinar o fluxo no duto na presença de perdas.

Os coeficientes de pressão (c_{p3}), potência (C_p) e empuxo (C_T) são:

$$c_{p3} = \varepsilon_1^2 (2 - \beta^2) - 2\varepsilon_1 \left[1 + \sqrt{(1 - \varepsilon_1)^2 + C_{Td} - \varepsilon_1^2 (1 - \beta^2)(1 - \eta_d)} \right] + 1 + C_{Td} - \varepsilon_1^2 (1 - \beta^2)(1 - \eta_d) \quad (1)$$

$$C_p = 2\varepsilon_1^2 \left[1 - \varepsilon_1 + \sqrt{(1 - \varepsilon_1)^2 + C_{Td} - \varepsilon_1^2 (1 - \beta^2)(1 - \eta_d)} - \frac{C_{Td}}{2\varepsilon_1} \right] \quad (2)$$

$$C_T = 2\varepsilon_1 \left[1 - \varepsilon_1 + \sqrt{(1 - \varepsilon_1)^2 + C_{Td} - \varepsilon_1^2 (1 - \beta^2)(1 - \eta_d)} - \frac{C_{Td}}{2\varepsilon_1} \right] \quad (3)$$

Onde C_{Td} é o coeficiente de empuxo do difusor, ε_1 é a razão de velocidade na esteira próxima, $\beta = A / A_3$ onde A é uma área aproximada na entrada do difusor A_3 é a área da seção transversal da saída do difusor e η_d é a eficiência do difusor.

Correção para o número infinito de pás

Para contabilizar o número finito de pás, utiliza-se o fator de perda de ponta de Prandtl da Equação 14. Assumindo $\varepsilon_1 = 1 - a$ e o fator de indução axial como $a = a_b F$. A razão de velocidade na esteira distante (ε_4) resulta em:

$$\varepsilon_4 = 1 - a_b F - \sqrt{(a_b F)^2 - (1 - a_b F)^2 (1 - \beta^2)(1 - \eta_d) + C_{Td}} \quad (4)$$

Os coeficientes elementares de empuxo, torque e potência, considerando F são:

$$\frac{dC_T}{dr_*} + \frac{dC_{Td}}{dr_*} = 4 \left[a_b F + \sqrt{(a_b F)^2 - (1 - a_b F)^2 (1 - \beta^2)(1 - \eta_d) + C_{Td}} \right] (1 - a_b) r_* \quad (5)$$

$$\frac{dC_M}{dr_*} = 8a_b' F \lambda (1 - a_b) r_*^3 \quad (6)$$

$$dP = \Omega dM = 4\rho a_b' F V_1 \Omega^2 r_*^3 \pi dr \quad (7)$$

Onde ρ é a massa específica do ar, a_b é o fator de indução tangencial, $r_* = r / R$, $a' = a_b' F$, $u_\theta = 2a_b' F \lambda r_*$ e $\lambda = \Omega R / V_0$ é a razão de velocidade de ponta da pá.

Integrando a Equação (7) obtém-se:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV_0^3} = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^{\lambda} a'_b F (1 - a_b) x^3 dx \quad (8)$$

Onde $x = \Omega r / V_0$ é a razão da velocidade local.

Correção para o empuxo

O empuxo da teoria do momento axial em alto fator de indução axial não concorda com dados experimentais. Portanto, utilizou-se uma equação quadrática geral de Vaz & Wood (2018), onde C_T e sua derivada em relação à ε_1 são:

$$C_T = b_0 + b_1 \varepsilon_1 + b_2 \varepsilon_1^2 \quad (9)$$

$$\frac{dC_T}{d\varepsilon_1} = b_1 + 2b_2 \varepsilon_1 \quad (10)$$

Onde b_0 , b_1 e b_2 são parâmetros sob as condições: para $\varepsilon_1 = 0$, $C_T = 2$, em que $b_0 = 2$. Para $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1opt}$, $C_T = C_p$. Essas condições são obtidas de Lock *et al.* (1926), na qual $\varepsilon_1 = 1 - a = 1 - Fa_b$. A correção para C_T ocorre quando $\varepsilon_1 < \varepsilon_{1opt}$. Se $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{1opt}$, então ε_1 é calculado pela Equação (12). Caso contrário, ε_1 é calculado usando:

$$\left(b_2 - \frac{\sigma_n C_n}{\sin^2 \phi} \right) \varepsilon_1^2 + b_1 \varepsilon_1 + b_0 = 0 \quad (11)$$

Onde σ é a solidez local, C_n é o coeficiente de força normal e ϕ é o ângulo de escoamento.

Teoria do elemento de pá para turbinas aumentadas por difusor

O BET leva a coeficientes de empuxo e torque em cada seção da pá. A formulação estendida para as velocidades de fluxo axial e tangencial são:

$$\frac{a_b}{1 - a_b} + \frac{1}{1 - a_b} \sqrt{a_b^2 - \left(\frac{1}{F} - a_b \right)^2 (1 - \beta^2) (1 - \eta_d)} + \frac{C_{Td}}{F^2} - \frac{1}{4F(1 - a_b)^2 r_*} \frac{dC_{Td}}{dr_*} = \frac{\sigma C_n}{2F \sin \phi^2} \quad (12)$$

$$\frac{a'_b}{1 + a'_b} = \frac{\sigma C_t}{4F \sin \phi \cos \phi} \quad (13)$$

Onde C_t é o coeficiente de força tangencial. A Equação (12) é fortemente dependente de C_{Td} , η_d e β . A precisão desta equação será avaliada.

Teoria do *momentum* do elemento de pá para pás curvadas (BEMT)

Aplicando o BEMT a um rotor com pás curvadas para trás as transformações matemáticas para o raio e corda, são:

$$r_i = \frac{r}{R_i} \Phi \left(\frac{r}{R_i}, \beta_i \right) \text{ e } c_i = c \cos \beta_i$$

Onde R_i é o raio na ponta da pá, r e c são o raio e a corda locais para uma pá reta, enquanto que β_i é o ângulo de curvatura local. O ângulo máximo de curvatura na ponta da pá é β° e $\beta_i = \beta^\circ / B_r$, onde B_r é o número de elementos da pá. Equações são utilizadas diretamente do modelo BEMT, onde $\cos \beta_i$ é o termo adicional principal para incluir o efeito *sweep* nas formulações de: ângulo de escoamento ϕ , velocidade relativa W , circulação de cada elemento de pá Γ , coeficiente de força normal C_n , coeficiente de força tangencial C_t e fatores de indução axial e tangencial. Glauert (1926) escreveu o fator Prandtl F em termos do ângulo de escoamento local, ϕ , em que:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} [\exp(-f)] \quad (14)$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{R_i - r}{2r \sin(\phi)}$$

Onde

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 mostra a pá gerada a partir do aerofólio NACA 2207, experimentada por Hoopen (2009) e utilizada neste trabalho. A pá reta desenhada em 3D e as pás otimizadas com efeito *sweep* (10°, 20°, 30° e 40°) apresentam 42 elementos de pá com seus respectivos raios, cordas e ângulos de torção, possuindo um comprimento de 0,745 m e espessura máxima de 0,007 m.

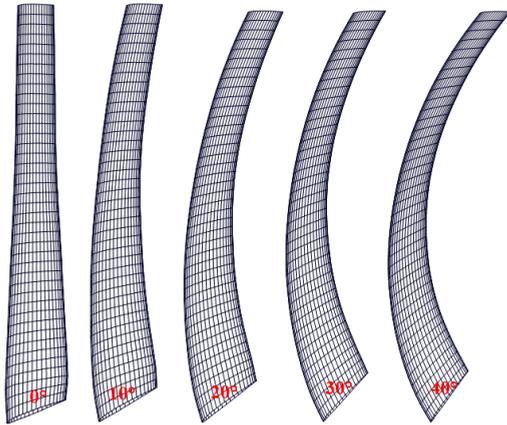


Figura 4. Pás otimizadas. (Autores, 2024).

Os resultados são expressos para uma rotação constante (716,2 rpm), variando somente C_{Td} , η_d e o efeito *sweep*.

O impacto significativo de C_{Td} e η_d no desempenho de um DAWT pode ser visto através do fator de aumento, A_f , definido como a razão entre a eficiência total da turbina, $\eta_t = \eta_p \eta_g C_p$, e o limite de Betz-Joukowski; $A_f = 27 \eta_t / 16$, onde η_p é a eficiência do sistema de transmissão e η_g é a eficiência do gerador.

A Figura 5 mostra os resultados para A_f usando o modelo proposto em comparação com resultados experimentais de Hoopen (2009), nota-se que os resultados concordam bem com os dados de 7 a 11 m/s. Neste caso, A_f foi calculado usando o valor medido de $C_{Td} = 0,1489$ para $\eta_d = 0,70; 0,75; 0,80$ e $0,85$, $\eta_p = 85\%$ e $\eta_g = 74\%$. Neste trabalho, os resultados da Figura 5 sugerem uma forte dependência de η_d e C_{Td} , e que a eficiência do difusor está entre 70 e 85%. Com isso, utiliza-se neste algoritmo $\eta_d = 0,80$.

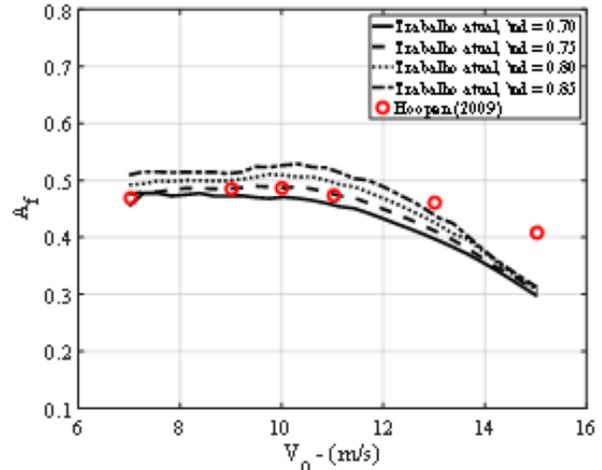


Figura 5. Fator de aumento. (Autores, 2024).

A Figura 6 mostra os resultados para a DAWT com o efeito *sweep*, onde a análise de performance é entre 7 e 11 m/s. A pá curvada em 10° apresentou uma média de aumento na eficiência (A_f) de 0,95% em relação a pá reta e alcançou um A_f máximo de 0,51 na velocidade de 9,8 m/s. Para a pá curvada com 20°, a média de aumento foi de $A_f = 3,54\%$ e seu A_f máximo foi de 0,53 em 9,3 m/s. A pá curvada em 30° apresentou uma média de aumento de $A_f = 7,33\%$ e um A_f máximo de 0,56 em 8,4 m/s. Para a pá curvada com 40°, a média de aumento foi de 9,0% e obteve um A_f máximo de 0,60 em 7 m/s. Evidentemente, ocorreu um aumento considerável no DAWT com efeito *sweep* para trás em relação a pá reta, os ângulos de 30° e 40° apresentaram a maior performance.

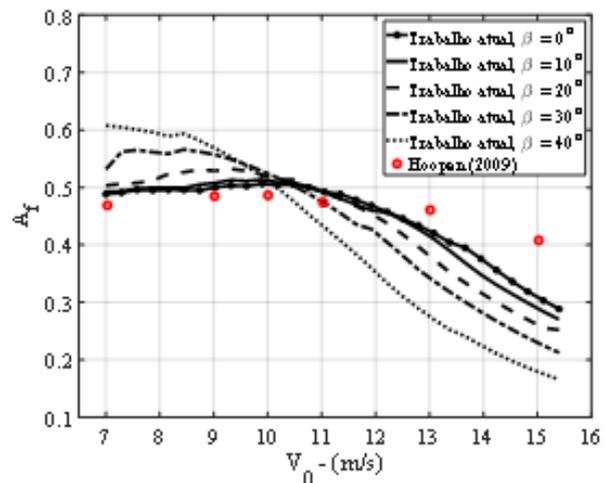


Figura 6. A_f com efeito *sweep*. (Autores, 2024).

Uma melhoria significativa no coeficiente de potência para o rotor otimizado com o efeito *sweep* é mostrada na Figura 7. Dependendo da condição de operação do DAWT a utilização de pás curvadas podem proporcionar um aumento no coeficiente de potência em relação a pá reta. Além disso, o limite de Betz-Joukowski para o coeficiente de potência é excedido para a pá com *sweep* para trás de 40° em uma λ de 6,90 a 7,9. O DAWT com o efeito *sweep* para trás em relação ao DAWT com a pá reta apresenta um coeficiente de potência inferior em altas velocidades de vento. O DAWT com o efeito *sweep* apresenta aumento no coeficiente de potência sob as seguintes condições de operações: λ de 5,14 a 7,98 (10°); λ de 5,14 a 7,98 (20°); λ de 5,57 a 7,98 (30°); λ de 5,73 a 7,98 (40°). Logo, percebe-se que dependendo das condições de operações de turbinas eólicas aumentadas por difusores pás retas são mais eficientes que pás curvadas e vice-versa.

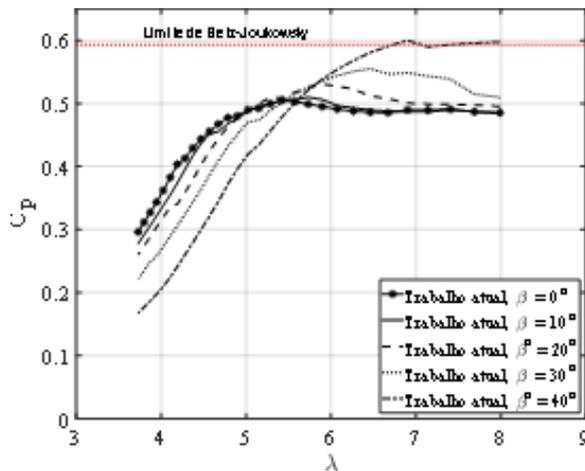


Figura 7. Coeficiente de potência. (Autores, 2024).

A Figura 8 mostra que o coeficiente de empuxo sobre o DAWT otimizado com pás curvadas é menor do que em pás retas para ambos os casos. Isso significa que ocorreu uma diminuição da carga aerodinâmica axial no rotor com efeito *sweep* para as condições de operações analisadas. Esses resultados concordam com o CFD de Zuo et al. (2016), que apontam, que possivelmente o empuxo em pás curvadas é menor do que em pás retas, conforme o aumento da velocidade de vento fica cada vez mais perceptível essa diferença.

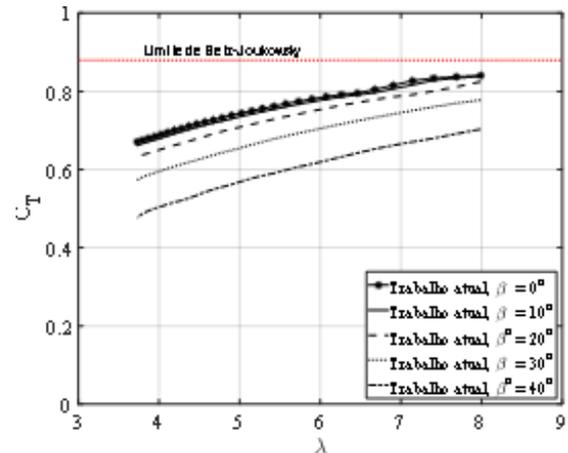


Figura 8. Coeficiente de empuxo. (Autores, 2024).

A Tabela 2 apresenta os resultados de Hoopen (2009) e do trabalho atual. A diferença do resultado experimental para o trabalho atual com a pá reta é de 0,3 %, demonstrando uma ótima concordância. O difusor por si só consegue aumentar a eficiência de um DAWT e Hoopen (2009) mostrou possíveis otimizações (*flap* de Gurney e GVs) no difusor que melhoram ainda mais a eficiência do DAWT, o presente trabalho com base nos resultados da Tabela 2 mostra que o efeito *sweep* também melhora a performance em um DAWT.

Devido A_f e C_p serem maximizados somente entre 7 e 9,75 m/s para a pá com efeito *sweep* para trás de 40°, esperava-se uma potência e torque menores que as demais.

Tabela 2. Comparação de performance.

| DAWT | V (m/s) | Ω (rpm) | P (W) | T (N.m) |
|------------------------------|---------|----------------|-------|---------|
| Hoopen, 2009. | 10 | 716,2 | 531 | 7,10 |
| Atual (Pá reta) | 10 | 716,2 | 532,6 | 7,10 |
| Atual ($\beta = 10^\circ$) | 10 | 716,2 | 537,4 | 7,17 |
| Atual ($\beta = 20^\circ$) | 10 | 716,2 | 542,0 | 7,23 |
| Atual ($\beta = 30^\circ$) | 10 | 716,2 | 542,3 | 7,23 |
| Atual ($\beta = 40^\circ$) | 10 | 716,2 | 520,3 | 6,94 |

CONCLUSÕES

A análise de performance deste trabalho mostra que pás curvadas podem aumentar a eficiência de um DAWT, os melhores resultados de performance foram para ângulos de curvatura de 30° e 40°. O trabalho mostra que os coeficientes de potência e empuxo dependem significativamente da eficiência do difusor.

Os resultados obtidos a partir dos modelos teóricos são relevantes para o atual estado da arte, pois mostraram um comportamento físico consistente com a realidade, se desmontando coerente com os dados experimentais de Hoopen (2009).

Outro ponto importante é que otimizações em turbinas eólicas são fundamentais para possibilitar maior eficiência, minimizando gastos extremos para uma geração de energia satisfatória, além da facilidade de instalação pois se tornaram cada vez mais compactas e com uma condição de operação ótima para baixas velocidades de ventos. O trabalho mostra um pouco desse contexto futurista, visto que, utiliza-se o difusor que é uma forma de aumento da eficiência bastante eficaz e que vem sendo estudado há décadas, e o efeito *sweep* que é uma otimização atual e pouco estudada para o aumento da eficiência de turbinas eólicas.

REFERÊNCIAS

- [1] Barbosa, D. L., Vaz, J. R., Figueiredo, S. W., Silva, M. D. O. E., Lins, E. F., & Mesquita, A. L. (2015). An investigation of a mathematical model for the internal velocity profile of conical diffusers applied to DAWTs. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 87(2), 1133-1148. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140114>
- [2] CRESESEB. (2017). História da Energia Eólica e suas utilizações. Acesso em: 02 de janeiro de 2024. Disponível em: https://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=3
- [3] de Souza Alves, A. C. ., Silva Modesto, C. T., Lima e Silva, W. K., P.C, T., Salinas-Silva, R., Camacho-Galindo, S., Costa Gomes, V. J., Guerrero-Martin, L. E., de Freitas, P. P., Restrepo-Linare, D. F., Corrêa Neto, S. S., & Guerrero, W. A. (2023). Estudio de la implantación de la energía eólica como fuente de suministro energético para una bomba de elevación artificial offshore. *Fuentes, El reventón energético*, 21(1), 95–104. <https://doi.org/10.18273/revfue.v21n1-2023007>
- [4] Dias, M. M. G., Camacho, R. R. G. (2022). Optimization of NREL phase VI wind turbine by introducing blade sweep, using CFD integrated with genetic algorithms. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03357-y>
- [5] Energiainteligente.(2024). *Cata-ventos pelomundo*. Disponível em: <https://energiainteligenteufff.com.br/category/energia-2/>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2024.
- [6] Gemaque, M. L. A., Vaz, J. R. P., & Saavedra, O. R. (2022). Optimization of Hydrokinetic Swept Blades. *Sustainability*, 14(21), 13968. <https://doi.org/10.3390/su142113968>
- [7] Glauert, H. (1926). *The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory*. Cambridge Univ. Press.
- [8] Glauert, H. (1935). *Aerodynamic theory*, in: W.F. Durand (Ed.), Chapter XI. Division L. New York - EUA. Springer. Airplanes Propellers.
- [9] Hoopen, P. D. C. (2009). *An Experimental and Computational Investigation of a Diffuser Augmented Wind Turbine: with an Application of Vortex Generators on the Diffuser Trailing Edge* [Master's Thesis]. Delft University of Technology.
- [10] Huang, X., Yang, J., Gao, Z., Sha, C., Yang, H. (2022). Output Power and Wake Flow Characteristics of a Wind Turbine with Swept Blades. *Machines*, 10(10), 876. <https://doi.org/10.3390/machines10100876>
- [11] Khalafallah, M. G, Ahmed, A. M., Emam, M. K. (2019). The effect of using winglets to enhance the performance of swept blades of a horizontal axis wind turbine. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(9). <https://doi.org/10.1177/1687814019878312>
- [12] Kim, P. C., & Murcia, J. P. (2017). Design of a wind turbine swept blade through extensive load analysis. *Renewable energy*, 102(A), 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.039>
- [13] Lock, C. N. H., Batemen, H., & Townsend, H. C. H. (1926). *An Extension of the Vortex Theory of Airscrews with Applications to Airscrews of Small Pitch, Including Experimental Results*. Aeronautical Research Committee Reports and Memoranda, Her Majesty's Stationery Office, London.
- [14] Lopes, J. J. A., Vaz, J. R. P., Mesquita, A. L. A., Mesquita, A. L. A., & Blanco, C. J. C. (2015). An approach for the dynamic behavior of hydrokinetic turbines. *Energy procedia*, 75, 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.334>

- [15] Martínez-Hernández, J., Parra-Reyes, N., Guerrero-Martin, L. E., Camacho-Galindo, L. S., Salinas Silva, R., Guerrero, W. A., & Guerrero-Martin, C. A. (2022). Análisis DOFA para la evaluación del potencial de energía eólica en Colombia. *Fuentes, el reventón energético*, 20(1), 45–56. <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022005>.
- [16] Restrepo-Linarez, D. F. (2023). Propuesta de políticas públicas para la promoción e incentivo del crecimiento de la generación de energía eólica en estados unidos. *Fuentes, el reventón energético*, 21(2), 121–132. <https://doi.org/10.18273/revfue.v21n2-2023008>.
- [17] Vaz, J. R. P., & Wood, D. H. (2016). Aerodynamic optimization of the blades of diffuser augmented wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 123, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.015>
- [18] Vaz, J. R. P., & Wood, D. H. (2018). Effect of the diffuser efficiency on wind turbine performance. *Renewable Energy*, 126, 969-977. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.013>
- [19] Veloso, M. J. G., dos Santos, C. H. P., Vaz, J. R. P., & Chavez Neto A. M. (2023). Quasi-Steady Analysis of a Small Wind Rotor with Swept. *Sustainability*, 15(13), 10211. <https://doi.org/10.3390/su151310211>
- [20] Zuo, H., Liu C., Yang H., & Wang F. (2016). Numerical study on the effect of swept blade on the aerodynamic performance of wind turbine at high tip speed ratio. *Journal of Physics, IOP publishing*, 753(10), 102010.