

EFEITO DE GRADE EM TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL COM MÚLTIPLAS PÁS

EFFECTO CASCADA EN UNA TURBINA EÓLICA DE EJE HORIZONTAL MULTIPALA

CASCADE EFFECT ON MULTIBLADED HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE

David L. P. Sousa^{1*}, Jean C. A. Nobre¹, Jerson R. P. Vaz², Silvio. B. Vale², Itoje. H. John³,
Tiago M. Pereira⁴

¹Universidade Federal do Pará, Belém, PA – Brasil.

²Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA – Brasil.

³Universidade de Calgary, Alberta, Canadá.

⁴Petrobras Transporte – Matriz, Filial PA, Belém, PA – Brasil.


*david.sousa@ananindeua.ufpa.br ; jean.nobre@ananindeua.ufpa.br ; jerson@ufpa.br ;
bispo@ufpa.br ; itoje.john@ucalgary.ca ; tiago.mpereira@transpetro.com.br 

Recibido: 17 de marzo de 2024. Aprobado: 27 de agosto de 2024. Versión final: 29 de noviembre de 2024.

Resumo

Apesar da sua utilização generalizada, as turbinas eólicas de eixo horizontal enfrentam desafios significativos, particularmente com o efeito de grade, um fenômeno que afeta diretamente a sua eficiência. O efeito de grade surge devido à proximidade das pás das turbinas eólicas, resultando em desvios nas linhas de corrente do vento e alterando a distribuição da pressão entre as seções das pás. Compreender o efeito de grade é crucial para evitar a superestimação da velocidade angular da turbina e evitar avaliações imprecisas da eficiência da turbina; no entanto, há uma falta de modelos preditivos confiáveis na literatura existente. O objetivo principal deste estudo é desenvolver um novo modelo para prever o efeito de grade em turbinas eólicas de eixo horizontal com múltiplas pás, utilizando a Teoria do *Momentum* do Elemento de Pá (BEMT). O modelo proposto centra-se na racionalização das alterações para corrigir o efeito de grade, incorporando quatro fenômenos delineados por Selig et al. (1995): flutuabilidade, bloqueio sólido, bloqueio de esteira e curvatura aerodinâmica. As equações do estudo representam desenvolvimentos específicos para correção do ângulo de ataque (α), resultando em coeficientes de sustentação (C_{Lc}) e arrasto (C_{Dc}) corrigidos. Esta abordagem aumenta a precisão dos parâmetros aerodinâmicos em turbinas com múltiplas pás, tendo em conta a influência do efeito de grade. A validação do modelo BEMT proposto envolveu compará-lo com dados experimentais de John, Vaz & Wood (2020). Os experimentos utilizaram pás retas com aerofólio curvo, comum em turbinas de múltiplas pás. Dados de Bruining (1979) foram incorporados ao modelo BEMT para determinar coeficientes de potência para rotores com múltiplas pás ($N = 3, 6, 12$ e 24), validando a eficácia do código. Os resultados demonstraram a eficácia do modelo na correção do efeito de grade, mostrando a sua relevância na melhoria da eficiência das turbinas eólicas no contexto global de produção de energia renovável.

Palavras-chave: Efeito de grade; Rotor com múltiplas pás; Turbina eólica; BEMT.

Cómo citar: Sousa, D. L. P., Nobre, J. C. A., Vale, S. B., John, I. H., Pereira, T. M. Efeito de grade em turbinas eólicas de eixo horizontal com múltiplas pás. *Fuentes, el reventón energético*, 22(2), 83-91. <https://doi.org/10.18273/revfue.v22n2-2024006> 

Resumen

A pesar de su uso generalizado, los aerogeneradores de eje horizontal enfrentan desafíos significativos, especialmente con el efecto cascada, un fenómeno que impacta directamente en su eficiencia. El efecto cascada surge debido a la proximidad de las palas del aerogenerador, lo que resulta en una desviación en las líneas de corriente del viento y altera la distribución de presión en las secciones de las palas. Comprender el efecto cascada es crucial para evitar sobreestimar la velocidad angular del aerogenerador y prevenir evaluaciones inexactas de su eficiencia; sin embargo, existe una falta de modelos predictivos confiables en la literatura existente. El objetivo principal de este estudio es desarrollar un modelo novedoso para prever el efecto cascada en aerogeneradores de eje horizontal con múltiples palas, utilizando la Teoría del Momento del Elemento de Pala (BEMT, por sus siglas en inglés). El modelo propuesto se centra en las alteraciones de la corriente para corregir el efecto cascada, incorporando cuatro fenómenos delineados por Selig et al. (1995): flotabilidad, bloqueo sólido, bloqueo de estela y curvatura de las líneas de corriente. Las ecuaciones en el estudio representan desarrollos específicos para corregir el ángulo de ataque (α_c), resultando en coeficientes de sustentación (C_{Lc}) y resistencia (C_{Dc}) corregidos. Este enfoque mejora la precisión de los parámetros aerodinámicos en aerogeneradores de múltiples palas, teniendo en cuenta la influencia del efecto cascada. La validación del modelo BEMT propuesto implicó compararlo con datos experimentales de John, Vaz & Wood (2020). Los experimentos utilizaron palas rectas con un perfil aerodinámico curvado, común en aerogeneradores de múltiples palas. Los datos de Bruining (1979) se incorporaron al modelo BEMT para determinar los coeficientes de potencia para rotores de múltiples palas ($N = 3, 6, 12$ y 24), validando la efectividad del código. Los resultados demostraron la eficacia del modelo en corregir el efecto cascada, destacando su relevancia para mejorar la eficiencia de los aerogeneradores en el contexto global de la producción de energía renovable.

Palabras clave: Efecto de cascada; Rotor de múltiples palas; Turbina eólica; BEMT.

Abstract

Despite their widespread use, horizontal-axis wind turbines face significant challenges, particularly with the cascade effect, a phenomenon directly impacting their efficiency. The cascade effect arises due to the proximity of wind turbine blades, resulting in deviation in wind streamlines and altering pressure distribution across blade sections. Understanding the cascade effect is crucial to avoid overestimating turbine angular velocity, and preventing inaccurate assessments of turbine efficiency, however, there is a lack of reliable predictive models in existing literature. The primary objective of this study is to develop a novel model for predicting the cascade effect in horizontal-axis wind turbines with multiple blades, utilizing the Blade Element Momentum Theory (BEMT). The proposed model focuses on streamlining alterations to correct the cascade effect, incorporating four phenomena outlined by Selig et al. (1995): buoyancy, solid blockage, wake blockage, and streamlines curvature. Equations in the study represent specific developments for correcting the angle of attack (α_c), resulting in corrected lift (C_{Lc}) and drag (C_{Dc}) coefficients. This approach enhances the accuracy of aerodynamic parameters in multi-blade turbines, accounting for the influence of the cascade effect. Validation of the proposed BEMT model involved comparing it with experimental data from John, Vaz, & Wood (2020). The experiments utilized straight blades with a curved airfoil, common in multiple-blade turbines. Data from Bruining (1979) were incorporated into the BEMT model to determine power coefficients for multi-blade rotors ($N = 3, 6, 12$, and 24), validating the code's effectiveness. Results demonstrated the model's efficacy in correcting the cascade effect, showcasing its relevance in improving the efficiency of wind turbines within the global context of renewable energy production.

Keywords: Cascade effect; Multibladed rotor; Wind turbine; BEMT.

INTRODUÇÃO

O interesse global na energia renovável tem impulsionado a popularidade da energia eólica, especialmente as turbinas de eixo horizontal de Restrepo-Linarez (2023), propõe políticas públicas inovadoras para promover a geração de energia eólica nos Estados Unidos, utilizando simulações do programa LEAP para prever o impacto dessas políticas no fornecimento de energia eólica. de Souza Alves et al. (2023), examina a integração da energia eólica como fonte de energia para sistemas de bombeamento artificial *offshore*, destacando sua contribuição para redução de custos operacionais de Martínez-

Hernández et al. (2022), discute o potencial da energia eólica na Colômbia, enfocando tanto aspectos técnicos quanto econômicos, além de avaliar estrategicamente oportunidades de desenvolvimento em regiões específicas do país.

No entanto, as turbinas com múltiplas pás enfrentam desafios de eficiência devido ao efeito de grade, que é causado pela interação entre as pás da turbina, alterando a pressão e desviando as linhas de corrente. Isso reduz a eficiência da turbina ao afetar forças como sustentação e arrasto.

Este estudo apresenta um novo modelo baseado na Teoria do *Momentum* do Elemento de Pá (BEMT) para prever o efeito de grade em turbinas eólicas de eixo horizontal com múltiplas pás. O modelo se concentra na simplificação das correções necessárias para mitigar o efeito de grade, levando em conta quatro fenômenos descritos por Selig et al. (1995): fluutuabilidade, bloqueio sólido, bloqueio de esteira e curvatura aerodinâmica. O estudo apresenta equações para corrigir o ângulo de ataque (α_c), obtendo coeficientes de sustentação (C_{Lc}) e arrasto (C_{Dc}) corrigidos. O modelo BEMT foi validado com dados experimentais de John, Vaz e Wood (2020). Dados de Bruining (1979) serão usados para validar o modelo BEMT para rotores com múltiplas pás ($N = 3, 6, 12$ e 24), demonstrando a eficácia do código.

As antigas turbinas eólicas, conhecidas como “Moinhos de Vento”, foram criadas para moer grãos e bombear água em áreas rurais. Essa tecnologia era crucial para os agricultores, sendo essencial para a operação agrícola. Segundo Burton et al. (2001), esses moinhos têm sido usados há cerca de três mil anos e ainda estão em uso.

As turbinas de eixo horizontal com múltiplas pás são projetadas para terem melhor desempenho em regiões com velocidade de vento mais baixas (Sessarego e Wood, 2015). As turbinas de eixo horizontal com múltiplas pás se assemelham às mais comuns de três pás, mas podem ter quatro, cinco ou mais pás, dependendo do projeto específico.

Spera (1994) propôs uma formulação matemática para corrigir interações fluidodinâmicas em rotores com múltiplas pás, posteriormente modificada por Mesquita e Alves (2000), que afirmaram concordância com outros resultados. No entanto, essa formulação não considera o efeito de grade, especialmente relevantes em seções internas de rotores com múltiplas pás. Esse efeito inclui o deslocamento das linhas de corrente causado pela espessura do aerofólio e a curvatura da trajetória do fluido entre a borda de ataque e a borda de fuga do perfil aerodinâmico.

Blanco, Gouveira e Mesquita (2017) apresentam uma metodologia para analisar rotores axiais de eixo horizontal, utilizados na captura de energia de rios.

Baseada no modelo de Glauert. Os autores discutem o impacto do efeito de grade no desempenho do rotor e propõem técnicas de otimização das pás para melhorar a sua eficiência.

O estudo de John, Vaz e Wood (2020) investiga moinhos de vento para bombeamento de água, que operam com baixa velocidade e alto torque devido ao rotor com múltiplas pás. A interação entre as pás e a operação em baixos números de Reynolds complicam o comportamento aerodinâmico do rotor. O estudo analisa o desempenho em túneis de vento de jato aberto com diferentes tamanhos de seção transversal, destacando que o torque medido foi significativamente maior para N em baixos valores de λ , implicando a necessidade de incorporar efeitos de solidez no modelo BET para operações abaixo do ponto de torque máximo. O bloqueio teve um impacto significativo no desempenho do rotor, aumentando com N , e correções padrão foram insuficientes para explicar o comportamento observado. O estudo ressalta a importância de considerar a σ na previsão do desempenho aerodinâmico, especialmente em altos valores de N , onde o alto bloqueio afetou significativamente o desempenho do rotor.

Pereira (2021) estudou o comportamento de medidores de vazão tipo turbina. O desafio foi determinar os coeficientes de sustentação e arrasto devido às múltiplas pás desses medidores. Aplicou-se o BET e CFD para desenvolver um modelo de simulação. Os resultados mostraram que o efeito de grade causou uma redução significativa na sustentação e arrasto.

METODOLOGIA NUMÉRICA

Teoria do *Momentum* do Elemento de Pá (BEMT):

É uma análise unidimensional que considera o escoamento em um volume de controle anular ao redor das pás da turbina, divididas em elementos anulares. Suposições incluem forças constantes em cada elemento, ausência de dependência radial entre elementos e um escoamento unidimensional, estacionário, incompressível e sem forças externas.

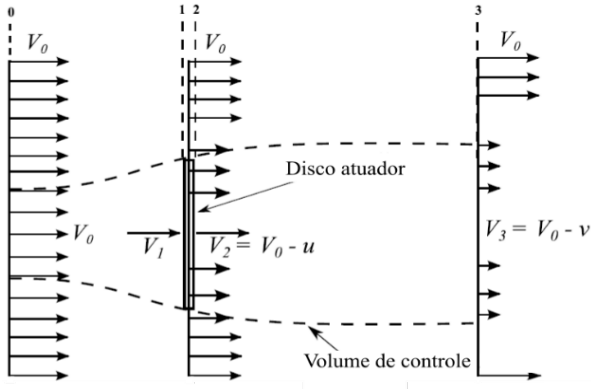


Figura 1. Volume de controle para a teoria do momento simples. (Adaptado de Clausen, Whale e Wood, 2021).

$$dE = \frac{1}{2} \rho W^2 c (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) N dr \quad (1)$$

$$dT = \frac{1}{2} \rho W^2 c (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r N dr \quad (2)$$

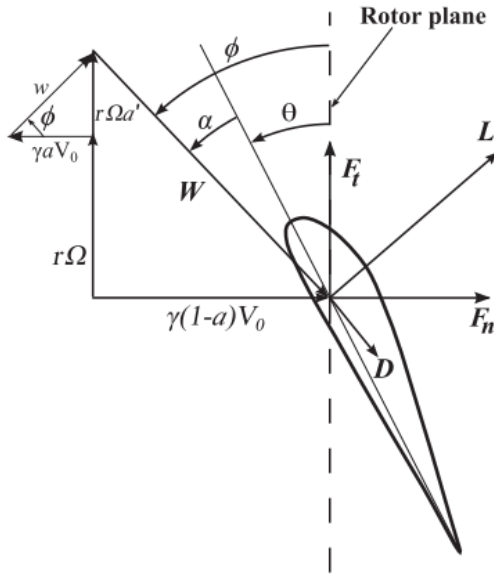


Figura 2. Diagrama de velocidades. (Vaz e Wood, 2016).

Quando se aplica o BET, é relevante destacar que a Equação 1 descreve o empuxo elementar sobre uma seção da pá da turbina. Portanto, a Equação 1 adquire a forma:

$$dE = \frac{1}{2} \rho N \frac{(1-a)^2 V_0^2}{\sin^2 \phi} c C_n dr \quad (3)$$

A Equação 2 fica:

$$dT = \frac{1}{2} \rho N \frac{(1-a)V_0}{\sin \phi} \frac{(1+a')\Omega r}{\cos \phi} c C_t r dr \quad (4)$$

As Equações 3 e 4 serão utilizadas para calcular as expressões dos fatores de indução da turbina.

Expressões para os fatores de indução axial (a) e tangencial (a'):

Igualando a Equação $dE = 4\pi\rho V_0^2 a F (1-a)r dr$ (Multiplica-se a Equação por F para remediar a limitação de ser válida apenas para $N = \infty$) e a Equação 3:

$$4\pi\rho V_0^2 a F (1-a)r dr = \frac{1}{2} \rho N \frac{(1-a)^2 V_0^2}{\sin^2 \phi} c C_n dr \quad (5)$$

Isolando a na Equação 3 encontra-se a expressão:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma C_n}{4F \sin^2 \phi} \quad (6)$$

De mesmo modo, igualando a Equação com a Equação 4, tem-se:

$$4\pi r^3 \rho V_0 \Omega a' F (1-a) dr = \frac{1}{2} \rho N \frac{(1-a)V_0}{\sin \phi} \frac{(1+a')\Omega r}{\cos \phi} c C_t r dr \quad (7)$$

Ao isolar na Equação 7, resulta em:

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma C_t}{4F \sin \phi \cos \phi} \quad (8)$$

As Equações 6 e 8 revelam que a e a' são determinados pelas forças atuantes em cada seção da pá, pela geometria da turbina, pela posição radial e pelo ϕ .

Para empregar o modelo BEMT, é necessário aplicar a correção de Glauert para altos fatores de indução axial ($a > 0,4$). Portanto:

$$C_E = \begin{cases} 4a(1-a), & a \leq 0,4 \\ 4a \left[1 - \frac{1}{4}(5-3a)a \right] & a > 0,4 \end{cases} \quad (9)$$

com a inclusão do fator F , assume a seguinte forma:

$$C_E = \begin{cases} 4a(1-a)F, & a \leq 0,4 \\ 4a \left[1 - \frac{1}{4}(5-3a)a \right] F & a > 0,4 \end{cases} \quad (10)$$

Quando $a \leq 0,4$, o a pode ser determinado usando a Equação 6. No entanto, quando $a > 0,4$, é necessário desenvolver a seguinte igualdade para os C_E :

$$4a \left[1 - \frac{1}{4}(5-3a)a \right] F = \frac{(1-a)^2 \sigma C_n}{\sin^2 \phi} \quad (11)$$

O lado direito da Equação 11 corresponde ao C_E dado pela Equação 3 na seguinte forma:

$$C_E = \frac{dE}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 dA} = \frac{dE}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 2\pi r dr} = \frac{(1-a)^2 \sigma C_n}{\sin^2 \phi} \quad (12)$$

Desse modo, o a com correção para altos valores é determinado pela solução da Equação 11:

$$\frac{3}{4}ka^3 - \left(\frac{5}{4}k+1 \right)a^2 + (k+2)a - 1 = 0 \quad (13)$$

sendo k :

$$k = \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_n} \quad (14)$$

Para evitar singularidades na Equação 14, incluiu-se o fator F no numerador, pois o fator de Prandtl é nulo na ponta da pá. A Equação 13 tem três raízes, mas apenas uma satisfaz às restrições físicas. Assim, determinou-se o a no BEMT da seguinte forma:

$$\begin{cases} a = \frac{1}{1+k}, & a \leq 0,4 \\ \frac{3}{4}ka^3 - \left(\frac{5}{4}k+1 \right)a^2 + (k+2)a - 1 = 0, & a > 0,4 \end{cases} \quad (15)$$

A correção para a , quando $a > 0,4$ na Equação 15, é expressa como uma equação cúbica. Esse aspecto pode levar a instabilidades numéricas no BEMT, já que resulta em três possíveis soluções para a . Conforme Spera (2009), a seguinte formulação para o C_E local é mais adequada para cálculos baseados na teoria dos vórtices e produz resultados precisos em comparação com dados experimentais.

$$C_E = \begin{cases} 4a(1-a)F, & a \leq a_c \\ 4 \left[a_c^2 + (1-2a_c)a \right] F & a > a_c \end{cases} \quad (16)$$

Quando $a > a_c = 0,2$, conforme indicado por Hansen (2008), torna-se necessário desenvolver a igualdade para os C_E obtidos por meio do AMT e do BET:

$$4 \left[a_c^2 + (1-2a_c)a \right] F = \frac{(1-a)^2 \sigma C_n}{\sin^2 \phi} \quad (17)$$

$$\begin{cases} a = \frac{1}{1+k}, & a \leq a_c \\ a = \frac{1}{2} \left\{ 2 + k(1-2a_c) - \sqrt{[k(1-2a_c)+2]^2 + 4(ka_c^2-1)} \right\}, & a > a_c \end{cases} \quad (18)$$

Correção para o efeito de grade:

Utilizou-se o rotor experimental de Wegereef (1984) e coordenadas de aerofólio (Figura 3), o estudo empregou um cubo de rotor projetado para acomodar múltiplas pás. As pás possuem as dimensões, corda: 0,04 m, espessura: 0,002 m e envergadura: 0,2 m. Todas as configurações de N utilizaram pás idênticas, com forma de arco circular de curvatura, e ângulo de torção variável de 46° na raiz até 17° na extremidade.

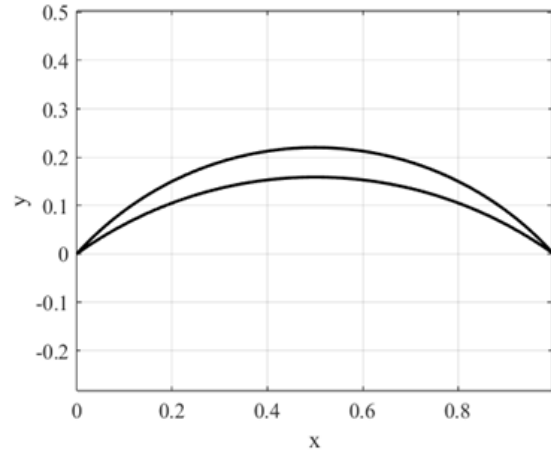


Figura 3. Perfil geométrico do aerofólio utilizado. (Autor, 2023).

Neste estudo, optou-se por utilizar as formulações de Wood (2011) para placas planas isoladas, apesar do uso de pás curvas em um rotor experimental. Essa escolha simplifica a análise e os cálculos, baseando-se na simplicidade analítica das formulações em comparação com outras mais complexas destinadas a perfis curvos. A decisão é justificada quando as diferenças nas

características aerodinâmicas entre pás curvas e placas planas não são consideradas significantes para os objetivos do estudo. As formulações são fornecidas por:

$$C_l = 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha = \operatorname{sen}(2\alpha) \quad (19)$$

$$C_d = 2 \operatorname{sen}^2 \alpha = 1 - \cos(2\alpha) \quad (20)$$

As Equações 19 e 20 foram comparadas com dados experimentais de Sheldahl e Klimas (1981) para perfis NACA 0015 e de Bruining (1979) para uma placa curvada. A comparação mostrou que essas equações têm uma correlação satisfatória com C_l e C_d , mesmo sem considerar o efeito de grade.

O estudo propõe correções para o efeito de grade em C_l e C_d (Equações 19 e 20), que são fundamentadas em formulações para ajustes devido ao bloqueio observado em túneis de vento, que afetam parâmetros de L e D de aerofólios. Consideram-se fenômenos associados aos limites laterais em testes bidimensionais: fluatibilidade, bloqueio sólido, bloqueio de esteira e curvatura da linha de corrente. Mas, somente correções relacionadas à curvatura das linhas de corrente foram adotadas, por sua relevância no efeito de grade em turbinas de múltiplas pás.

Os experimentos de Selig *et al.*, (1995) focaram apenas em medições de sustentação e ângulo de ataque, sem considerar o momento. As correções propostas foram aplicadas somente a esses parâmetros, então:

$$\Delta C_{lc} = \sigma_c C_l \quad (21)$$

$$\Delta \alpha_c = \frac{57,3\sigma_c}{2\pi} (C_l + 4C_{m,c/4}) \quad (22)$$

$$\sigma_c = \frac{\pi^2}{48} \left(\frac{c}{h_{ts}} \right)^2 \quad (23)$$

em que h_{ts} é a altura da seção de teste.

Aprimorou-se a Equação 22 para considerar a correção do efeito de grade. Ao passar pelo rotor, dois efeitos distintos afetam o fluxo: (1) aumento na velocidade tangencial entre as bordas de ataque e de fuga do aerofólio, resultando em um fluxo curvo, e (2) uma componente axial aumentada devido à redução da área entre as pás causada pela espessura do aerofólio. Esses efeitos foram incorporados no desenvolvimento subsequente para :

$$\alpha_c = \alpha_u - \Delta \alpha_c \quad (24)$$

$$\alpha_c = \alpha_u - \frac{57,3\sigma_c}{2\pi} C_l \quad (25)$$

No contexto do efeito de grade, a altura da seção de teste equivale à distância entre duas pás adjacentes:

$$h_{ts} = \frac{2\pi r}{B} = \frac{c}{\sigma} \quad (26)$$

Substituindo a Equação 26 em 23, tem-se:

$$\sigma_c = \frac{\pi^2}{48} (\sigma)^2 \quad (27)$$

Substituindo a Equação 27 em 25, o novo α é:

$$\alpha_c = \alpha_u - k_c (\sigma)^2 C_l \quad (28)$$

A constante k_c está relacionada à geometria do aerofólio, afetando a curvatura das linhas de corrente entre as pás. A correção do ângulo de ataque (α) varia com a σ . Quanto maior a σ , maior a correção devido ao efeito da grade da turbina, influenciando C_l e C_d . Para aerofólios isolados, onde $\sigma = 0$, a correção não é necessária, mantendo-se o ângulo de ataque original. Substituindo na Equação 28, obtém-se:

$$\alpha_c = \alpha_u - k_c \left(\frac{Bc}{2\pi r} \right)^2 C_l \quad (29)$$

Assim, C_l e C_d corrigidos devido ao efeito de grade para uma placa plana são dados por:

$$C_{lc} = \operatorname{sen}(2\alpha_c) \quad (30)$$

$$C_{dc} = 1 - \cos(2\alpha_c) \quad (31)$$

Resultados

Validou-se o modelo BEMT comparando os dados experimentais de John, Vaz e Wood (2020), que realizaram os experimentos especificamente para pás retas. No contexto desta pesquisa, optou-se por empregar um aerofólio curvo comumente utilizado em turbinas de múltiplas pás ($N = 3, 6, 12$ e 24), especialmente em sistemas de bombeamento de água. Os C_l e C_d desse aerofólio foram determinados por Bruining (1979) para $Re = 60000$ e foram incorporados ao modelo BEMT proposto. Essa comparação permitiu

determinar o C_p para todas as configurações do rotor (Figura 4), assim, validando o código desenvolvido.

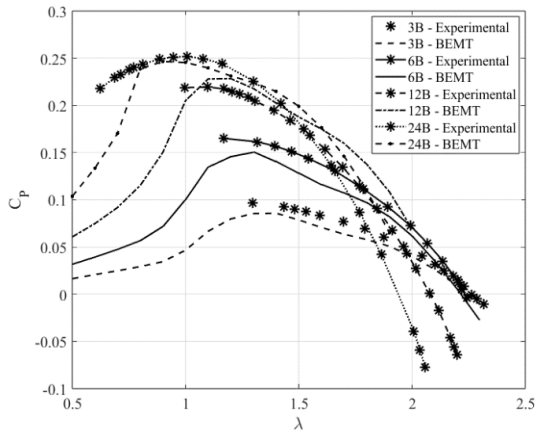


Figura 4. Validação: experimentais x BEMT. (Autor, 2024).

Os dados experimentais de John, Vaz e Wood (2020) e simulações do BEMT consistentemente subestimam os valores experimentais, revelando limitações na precisão da representação do comportamento aerodinâmico em diversas configurações de pás. Isso ressalta a necessidade de otimizar o modelo para capturar o efeito de grade, o que pode resultar em melhorias significativas em prever o desempenho da turbina em diferentes condições operacionais.

Resultados do modelo proposto:

Os resultados obtidos foram alcançados levando em consideração os parâmetros de projeto e as condições operacionais da turbina eólica (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros de projeto e condição de operação da turbina eólica. (Autor, 2024).

Parâmetro	Valor
Diâmetro da turbina [m]	0,68
Diâmetro do cubo [m]	0,11
Número de pás [adimensional]	3, 6, 12 e 24
Velocidade de corrente [m/s]	15
Massa específica do ar [kg/m³]	1,2
Velocidade angular [rad/s]	22,06
Perfil aerodinâmico [adimensional]	Rotor exp. de Wegereef (1984)

Para avaliar o kc na Equação 28, foram realizados ajustes variando N (Tabela 2). Para configurações de 3, 6 e 12 pás, a TSR é mantida em 0,5, mas para 24 pás, é ajustada para 0,63 devido à instabilidade numérica no

código BEMT para altos valores de N .

Tabela 2. Fator kc para diferentes N . (Autor, 2024).

Número de pás (N)	TSR (λ)	Fator de correção (kc)
3	0,50	2,20
6	0,50	2,30
12	0,50	2,10
24	0,63	2,40
Média		2,25
Desvio padrão		0,13
Melhor variação de kc		2,27

Os C_p máximos do rotor otimizado para as variações de N são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. C_p do rotor otimizado. (Autor, 2024).

N	Exp	BEMT	BEMT kc
3	0,097	0,085	0,091
6	0,165	0,150	0,154
12	0,219	0,228	0,217
24	0,252	0,247	0,231

A análise dos resultados experimentais para o Coeficiente de Potência (C_p) revela variações significativas com o número de pás (N). Os dados experimentais sugerem um aumento do C_p com o aumento de N , indicando uma melhoria na eficiência da conversão de energia eólica em potência (Figura 5). No entanto, a aplicação da Teoria do *Momentum* do Elemento de Pá sem correção (BEMT) resulta consistentemente em uma subestimação dos valores experimentais, evidenciando limitações no modelo para representar com precisão o comportamento aerodinâmico em diferentes configurações de pás.

É crucial considerar o impacto do efeito de grade na precisão da avaliação do C_p . Esse fenômeno afeta diretamente as forças aerodinâmicas e os coeficientes de turbina ao desviar as linhas de corrente do vento e influenciar a distribuição de pressão sobre as seções da pá, afetando a eficiência da turbina.

A introdução do fator de correção (kc) no modelo BEMT desempenhou um papel crucial na busca por uma maior concordância teórico-experimental. Essa correção visa compensar as consequências do efeito de grade não consideradas no modelo não corrigido. Com a inclusão do kc , os valores teóricos se aproximaram mais dos dados experimentais, indicando uma representação mais precisa do fenômeno aerodinâmico em turbinas eólicas.

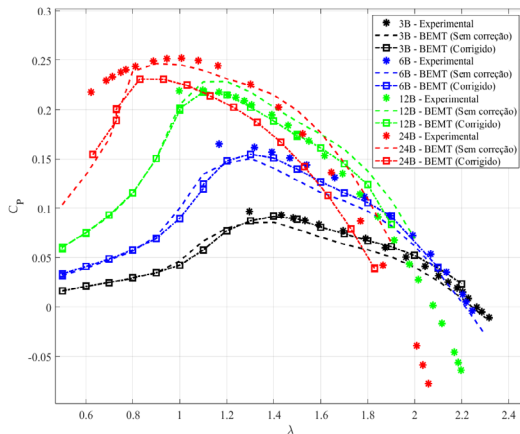


Figura 5. Resultados de C_p : dados experimentais x BEMT sem correção x BEMT corrigido. (Autor, 2024).

A análise dos resultados obtidos (Figura 5) revela melhorias percentuais consistentes com a correção para diferentes valores de N . Para $N = 3$, observa-se uma melhora de aproximadamente 7,06 %, enquanto para $N = 6$, essa melhora é de cerca de 2,67 %. Notavelmente, para $N = 12$, a melhoria percentual é de aproximadamente 4,82 %. No entanto, para $N = 24$, uma mudança interessante é observada, com uma melhoria percentual de cerca de -6,48 %. Essa queda sugere uma redução no C_p corrigido em relação ao C_p sem correção, o que aponta para uma peculiaridade neste cenário específico. É importante ressaltar que o BEMT sem correção para $N = 24$ apresenta resultados promissores. Isso sugere que, apesar da aparente redução no C_p corrigido, há potencial para melhorias significativas no desempenho com um projeto otimizado da pá. Este resultado está alinhado com as teorias propostas por Glauert (1935), que indicam o C_p ideal de um moinho de vento em $\lambda = 0,5$ sendo 0,288.

CONCLUSÃO

Os resultados experimentais e as simulações do modelo BEMT revelam uma subestimação consistente dos valores experimentais, destacando a necessidade de aprimoramento do modelo, especialmente considerando o efeito de grade. A introdução do fator de correção (kc) foi fundamental para aproximar os resultados teóricos dos dados experimentais, resultando em melhorias significativas na representação do comportamento aerodinâmico das turbinas eólicas. Embora a correção tenha levado a melhorias gerais, houve uma redução no coeficiente de potência corrigido para $N = 24$, sugerindo a necessidade de um projeto otimizado da pá nesse caso. Considerar o

impacto do efeito de grade é crucial para melhorar a precisão do modelo BEMT na previsão do desempenho das turbinas em diversas condições operacionais, fornecendo insights valiosos para o desenvolvimento futuro de modelos aerodinâmicos e contribuindo para o avanço da eficiência eólica e o uso sustentável da energia renovável.

REFERÊNCIAS

- Blanco, C. J. C., Gouveia, A. V., & Mesquita, A. L. A. (2017). Análise hidrodinâmica de rotores axiais para aproveitamento da energia cinética dos rios. *Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences*. p. 1887-1890.
- Bruining, A. (1979). Aerodynamic Characteristics of a Curved Plate Airfoil Section at Reynolds Numbers 60,000 and 100,000 and angles of attack from -10 to +90 degrees. *Delft University of Technology*, Report LR-281.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, Ltd
- Clausen, P., Whale, J., & Wood, D. (2021). Small Wind and Hydrokinetic Turbines. V169 de *Energy Engineering*. Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/PBPO169E>
- 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-Linarez, 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>
- Hansen, M. O. L. (2015) *Aerodynamics of wind turbines*. Routledge.
- John, I. H., Vaz, J. R. P., & Wood, D. (2020). Aerodynamic performance and blockage investigation of a cambered multi-bladed windmill. *Journal of Physics: Conference Series*, 1618, 042003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/4/042003>.
- Mesquita, A. L. A., & Alves, A. S. G. (2000). An improved approach for performance prediction of HAWT using the strip theory. *Wind Engineering*, 24(6), 417-430. <https://doi.org/10.1260/030952400320769802>.

- Pereira, T. M. (2021). *Estudo do comportamento hidrodinâmico de medidores de vazão de gás liquefeito de petróleo utilizado a teoria do elemento de pá com efeito de grade* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Pará, Brasil.
- 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>
- Selig, M. S., Guglielmo, J. J., Broeren, A. P., and Giguere, P. (1995). *Summary of Low-Speed Airfoil Data*, Volume 1. Virginia, SoarTech Publications.
- 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>
- Sessarego, M., & Wood, D. (2015). Multi-dimensional optimization of small wind turbine blades. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40807-015-0009-x>.
- Sheldahl, R., & Klimas, P. (1981). *Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines*, Sandia National Laboratories, report SAND80-2114. <https://doi.org/10.2172/6548367>.
- Spera, D. A. (1994). *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*. ASME Press, New York.
- Spera, D. A. (2009). *Wind Turbine Technology: Fundamentals Concepts in Wind Turbine Engineering*, ASME Press, 2nd Ed.
- 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>
- Wegereef, E. (1984). Scale model of the ITDG 6 m rotor wind tunnel tests for different blade setting angles. *Report of Twente University of Technology, Netherlands, windmill group., WM, 76*.
- Wood, D. (2011). *Small wind turbines em Advances in wind energy conversion technology* (pp. 195-211). Springer.