

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

# SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento  
23/11 | 100% online  
24/11 | e gratuito

## MODELOS TEÓRICOS PARA ANÁLISE DE TURBINAS EÓLICAS E HIDROcinÉTICAS

**Jean Carlos de Almeida Nobre**  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, Pará, Brasil  
jean.nobre@ananindeua.ufpa.br

**David Lohan Pereira de Sousa**  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, Pará, Brasil  
david.sousa@ananindeua.ufpa.br

**Larissa dos Santos Borges**  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, Pará, Brasil  
larissa.borges@ananindeua.ufpa.br

**Resumo:** As energias eólicas e hidrocínéticas são formas de energias renováveis obtidas através do aproveitamento do vento e da água. Elas vêm se tornando cada vez mais populares e desenvolvidas em todo o mundo como uma alternativa limpa e sustentável para a produção de eletricidade. Basicamente o funcionamento das turbinas ocorre quando os fluidos atingem as pás, logo, a energia cinética é convertida em energia mecânica, que por sua vez é transformada em energia elétrica através de um gerador. O objetivo deste trabalho é demonstrar dois importantes métodos teóricos para análise de turbinas eólicas onde são ilustrados resultados de pesquisas validando estes métodos. Os modelos são o da Teoria do Elemento de Pá e a Teoria do Momentum do Elemento de Pá. Esses modelos teóricos são comumente usados para simulações computacionais diminuindo a necessidade de testes ou experimentos práticos para instalação de turbinas. Foi mostrado também algumas pesquisas aplicando estes modelos teóricos por meio computacional. Avanços tecnológicos têm melhorado a eficiência e a adaptabilidade das turbinas, tornando-as cada vez mais competitivas em relação às fontes de energia convencionais. No futuro, espera-se que as turbinas eólicas desempenhem um papel ainda mais significativo na matriz energética global.

**Palavras-chave:** Modelos teóricos, Teoria do Elemento de Pá, Teoria do Momentum do Elemento de Pá, BET, BEM.

### 1. INTRODUÇÃO

As energias eólicas e hidrocínéticas são formas de energias renováveis obtidas através do aproveitamento do vento e da água. Basicamente o funcionamento das turbinas ocorre quando os fluidos atingem as pás, logo, a energia cinética é convertida em energia mecânica, que por sua vez é transformada em energia

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

# SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento  
23/11 | 100% online  
24/11 | e gratuito

elétrica através de um gerador. Existem várias configurações de turbinas, sendo as mais comuns de eixo horizontal e de eixo vertical.

As energias eólicas e hidrocínéticas são fontes limpas e renováveis, que não emitem gases poluentes para a atmosfera. Além disso, as turbinas são facilmente integradas ao ambiente, podendo ser instaladas em áreas rurais ou marítimas. No entanto, existem também desafios e limitações para a expansão dessas energias renováveis. Uma dessas limitações é a dependência das condições climáticas e territoriais. Além disso, a instalação de parques eólicos e turbinas hidrocínéticas podem gerar impactos ambientais, como a interferência na migração de aves, alteração visual da paisagem, intervenção na vida aquática, entre outros. A pesquisa tem por finalidade mostrar dois métodos teóricos importantes para análise de turbinas eólicas popularmente usados por meio de simulação computacional, onde são expressos resultados de pesquisadores que utilizam estes métodos. Estes métodos teóricos são o BET (Teoria do Elemento de Pá) e o BEM (Teoria do Momentum do Elemento de Pá) baseados em leis clássicas de conservação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A teoria de elementos de pá (BET) foi proposta por Drzwiecki em 1982 para o estudo de hélice do avião e otimizada por Glauert em 1935. Como base desta teoria a pá é dividida em seções independentes (que não interagem entre si) onde todos os cálculos são feitos utilizando a aerodinâmica bidimensional. Isto quer dizer que são desprezados todos os efeitos tridimensionais, atuando cada perfil como um perfil bidimensional. Integrando ao longo de toda a pá (desde a raiz da pá à ponta da mesma) podemos calcular a propulsão e a potência total. Analisando então um perfil de largura  $dy$  distanciado de  $y$  do eixo de rotação (HANSEN, 2015; SØRENSEN, 2016; SPERA, 1994).

A teoria *Blade Element Momentum* (BEM) leva em consideração a influência da esteira turbulenta, originada pela rotação do rotor por meio de fatores de indução, para encontrar as forças atuantes. A teoria clássica BEM, desenvolvida por Betz e Glauert (1935), combinam as teorias de Momento e de Elemento de pá de forma que permita o cálculo das características de desempenho de uma seção anular do rotor e as características para todo o rotor são então obtidas integrando os valores de cada uma das seções. A junção das teorias gera um processo iterativo que relaciona as forças tangenciais e axiais para serem definidos os fatores de indução tangencial e axial. A partir destes fatores, pode-se obter o ângulo de ataque e a velocidade do vento em relação à cada elemento da pá, e calcular as forças aerodinâmicas e o torque no rotor, bem como a potência da turbina. A teoria clássica BEM tem limitações por considerar o rotor como um disco ideal com número infinito de pás e a velocidade relativa constante ao longo do tempo e da altura. (HANSEN, 2015; SØRENSEN, 2016; SPERA, 1994).

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

# SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento  
23/11 | 100% online  
24/11 | e gratuito

### 3. METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é demonstrar dois importantes métodos teóricos para análise de turbinas eólicas onde são ilustrados resultados de pesquisas validando estes métodos. Os modelos são o da Teoria do Elemento de Pá e a Teoria do Momentum do Elemento de Pá mostrados no capítulo 2 (Revisão Bibliográfica).

Esses modelos teóricos são comumente usados para simulações computacionais diminuindo a necessidade de testes ou experimentos práticos para instalação de turbinas.

O trabalho analisado utilizando o modelo BET foi o de Vaz, J. R. P. e Wood, D. H., 2018.

O trabalho analisado utilizando o modelo BEM foi o de Gemaque M. L. A., Vaz J. R. P. e Saavedra O. R., 2022.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES: PESQUISAS COM OS MODELOS BET E BEM

O trabalho de Vaz, J. R. P. e Wood, D. H., 2018, apresenta uma nova análise do desempenho de uma turbina eólica com difusor, tendo em conta a influência da eficiência do difusor e do empuxo. O modelo matemático estende a teoria dos elementos de pá para incluir a eficiência do difusor na formulação da velocidade axial, que, por sua vez, modifica o empuxo e a potência. Além disso, é apresentada uma correção para o empuxo elevado do rotor, em que é utilizada uma equação quadrática para incorporar as perdas no difusor. Foi desenvolvido e implementado um algoritmo para avaliar o desempenho da DAWT. O novo modelo foi validado por comparação com dados experimentais de Hoppen 2009, Hansen et al. 2000 e Phillips, 2003. O novo modelo foi validado por comparação com dados experimentais e mostra uma boa concordância quando se assume uma eficiência do difusor de 80%. O impacto do difusor é avaliado pelo fator de aumento, razão entre a eficiência da turbina e o limite de Betz-Joukowsky. Mostra-se, por exemplo, que o fator de aumento excede a unidade apenas para uma eficiência maior que 74% quando o empuxo do difusor é 0,2 do empuxo total e a razão entre a área do rotor e a área de saída do difusor é 0,54 do difusor é de 0,54.

Gemaque M. L. A., Vaz J. R. P. e Saavedra O. R., 2022, realizaram uma otimização no modelo BEM para turbinas hidrocínéticas com pás curvadas e retas, mostrando resultados com boas contribuições para o estado da arte. O modelo possui baixo custo computacional e fácil implementação numérica. A partir dos resultados do algoritmo nota-se que a tipologia das pás afeta fortemente as distribuições de corda e o ângulo de torção ao longo da pá, aumentando o torque da turbina e o coeficiente de potência.

PUC-Campinas EESC USP Comitês PCJ

APRESENTAM:

# SUSTENTARE & WIPIS2023

WORKSHOP INTERNACIONAL

SUSTENTABILIDADE, INDICADORES E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS



22/11 | evento  
23/11 | 100% online  
24/11 | e gratuito

## 5. CONCLUSÕES

Nota-se que além de contribuir para análise de turbinas os métodos teóricos precisam de aprimoramentos analíticos para que se aproximem ao máximo da realidade, pode-se perceber isso nas pesquisas analisadas. Em suma, a energia eólica é uma fonte promissora de energia renovável, capaz de contribuir para a diversificação da matriz energética e para a redução do impacto ambiental. Seu desenvolvimento contínuo depende da superação de desafios técnicos e socioambientais, mas seu potencial de crescimento é indiscutível.

## REFERÊNCIAS

- [1] Gemaque, M.L.A.; Vaz, J.R.P.; Saavedra, O.R. (2022). Optimization of Hydrokinetic Swept Blades. *Sustainability*, 14, 13968. <https://doi.org/10.3390/su142113968>.
- [2] Glauert, H., (1935). *Airplane Propellers*, in *Aerodynamic Theory* (Ed. W. F. Durand), Div. L.
- [3] Hansen M. O. L. (2015). *Aerodynamics of wind turbines*. Routledge.
- [4] Hansen M.O.L., Sorensen N.N., Flay R.G.J., (2000). Effect of placing a diffuser around a wind turbine, *Wind Energy*. v3 207-213.
- [5] 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*, M.Sc. Thesis, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, National Aerospace Laboratory.
- [6] Phillips D.G. (2003)., An Investigation on Diffuser Augmented Wind Turbine Design, PhD. thesis, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, The University of Auckland,
- [7] Sørensen J. N. (2016). *General momentum theory for horizontal axis wind turbines*, volume 4. Springer,
- [8] Spera D. A. et al. (1994). *Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering*, volume 3. ASME press New York,
- [9] Vaz J. R. P. and Wood. D. H. (2018). Effect of the diffuser efficiency on wind turbine performance. *Renewable Energy*, 126:969–977.