

## ANÁLISE DE DESEMPENHO AERODINÂMICO DE PÁS PARA GERADOR EÓLICO, UTILIZANDO O SOFTWARE QBLADE

João Francisco Reis Corrêa<sup>1</sup>, Ricardo Wagner Roquetti Filho<sup>1</sup>,  
Heidi Korzenowski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, joaofrcorrea98@gmail.com, ricroquetti@gmail.com, heidi@univap.br

### Resumo

O presente trabalho apresenta uma proposta de análise de desempenho de diferentes perfis aerodinâmicos para pás de geradores eólicos. As análises são realizadas pelo software QBlade, que otimiza todo o desenvolvimento da pá somente com alguns parâmetros a serem definidos, como o TSR (Tip-Speed Ratio), diâmetro do rotor, número de Reynolds e Velocidade. Com estas entradas, o software apresenta o melhor modelo tridimensional, com a modelagem de ângulo de ataque, tamanho de corda e ângulo de torção adequados. A partir destas simulações obtém-se o perfil que gera o melhor coeficiente de potência em relação às rotações por minuto (RPM) e às condições estruturais.

**Palavras-chave:** Desempenho. QBlade. Energia.

**Área do Conhecimento:** Engenharia Aeroespacial.

### Introdução

A matriz energética brasileira é composta predominantemente por fontes renováveis, providas das hidrelétricas, e isso se deve à abundância hídrica que o país possui. Porém, com o impacto socioambiental que essas usinas causam e as crises energéticas causadas por períodos de seca, viu-se a necessidade de outras fontes renováveis de energias, como por exemplo a energia eólica.

Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), em maio de 2023, a matriz elétrica brasileira chegou na marca de 83,55% de energia vindo de fontes renováveis, sendo elas: usinas hidrelétricas, usinas fotovoltaicas, parques eólicos e também algumas fontes de energias providas de matéria orgânica, como a Biomassa. Essa marca só foi possível devido aos altos investimentos do setor público-privado para conseguir realizar a total transição energética até 2050, ano em que foi acordado pela a cúpula da Organização das Nações Unidas (ONU) para zerar a emissão de CO<sub>2</sub>. Até abril de 2023, a expansão da capacidade produtiva de energia no Brasil aumentou significativamente, onde 86% da capacidade total instalada foram de usinas eólicas e solares fotovoltaicas, representando um aumento de 1.643 MW e 1.243,4 MW de potência gerada, respectivamente. As fontes de energias renováveis, mais precisamente a eólica, têm tido uma expansão extremamente positiva no mundo, não só por ser uma necessidade pública, mas por ser responsável por diversas outras causas na sociedade, como o desenvolvimento sustentável do país, incentivo a geração de empregos na área tecnológica e ambiental, além de melhorar a saúde e qualidade de vida para todos que desfrutam de seus benefícios.

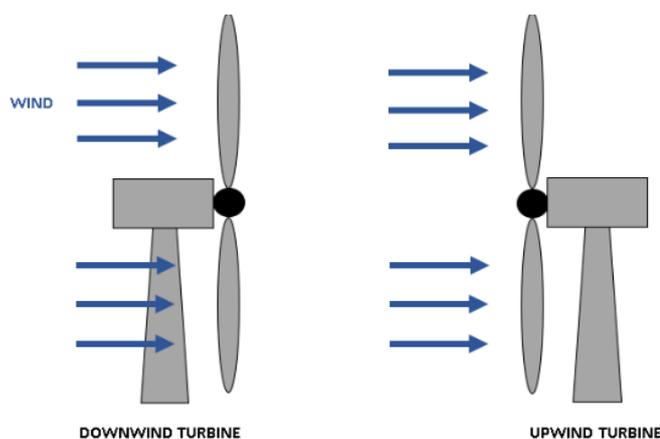
Um problema que afeta principalmente grande parte das universidades do país, é a falta de divulgação e incentivo de cursos de engenharia e estudos científicos nesta área de atuação, fazendo com que o desenvolvimento de novos projetos de aerogeradores e melhorias que poderiam ser implementadas, sejam interrompidas e fazendo com que o Brasil tenha dificuldade em reter seus talentos neste campo tão importante para a sustentabilidade.

Com base nestes critérios, foi elaborado um projeto para realizar uma análise em três diferentes perfis aerodinâmicos (E374, Clark Y e S4062) (Wenzel, 2007), utilizando o software QBlade, que foi desenvolvido especificamente para projeto e modelagem de pás de aerogeradores, para fazer uma comparação entre elas e determinar, tanto o melhor perfil da pá, visando os seus parâmetros operacionais e estruturais, quanto as melhores características que devem ser levadas em consideração no desenvolvimento de um sistema tri-pá convencional.

## Metodologia

As turbinas eólicas são classificadas em função da posição do rotor e das pás para com o fluxo do vento, podendo ser “upwind” ou “downwind”. As turbinas “upwind” possuem o rotor eólico posicionado pouco à frente da torre, conduzindo a passagem do vento, diretamente, pelas pás. As turbinas “downwind” possuem uma inclinação no posicionamento do sistema, permitindo que os ventos passem, primeiro, por trás da turbina eólica e depois por suas pás (Hansen, 2008). Na Figura 1 são apresentadas estas duas formas mais utilizadas deste sistema.

Figura 1 – Desenho esquemático de um perfil aerodinâmico fixado em um rotor de eixo horizontal.



Fonte: Os autores.

Os principais componentes de um aerogerador são:

- Pás do Rotor: recebem a energia do vento e a transformam em energia rotacional no eixo conectado ao rotor. Uma turbina eólica necessita ter de 1 a 4 pás. Contudo, com apenas uma pá teríamos problemas com o balanceamento da turbina e as vibrações a longo prazo poderiam destruir nossa pá. Uma turbina com duas pás giraria muito rápido, o que causaria problemas, como ruído excessivo e altos esforços mecânicos causados pelo efeito da força centrífuga. Com 4 pás o ganho de eficiência comparado à turbina de 3 pás seria muito baixo e acrescido do investimento de ter mais uma pá. Assim, uma turbina eólica horizontal de 3 pás apresenta uma boa relação entre coeficiente de potência, custo de instalação e velocidade de rotação, além de ter uma estabilidade maior comparado à turbina de 2 pás. Os principais componentes de um aerogerador são:

- Eixo: realiza a transferência da energia rotacional para o gerador elétrico;
- Gerador elétrico: gera eletricidade por meio de eletromagnetismo utilizando a energia de rotação;
- Torre de Sustentação: Responsável por manter o conjunto rotor na altura determinada pelo projeto, sustentando seu peso.

Como a velocidade do vento após o disco atuador não pode ser zero, é fisicamente impossível aproveitar toda a potência do vento. Assim, o limite máximo teórico da potência não é a potência disponível. Este limite máximo denomina-se Limite de Betz, e estabelece a eficiência máxima teórica com a qual um rotor de turbina eólica pode converter a energia cinética do vento em energia mecânica. O Limite de Betz afirma que, em um sistema ideal, uma turbina eólica não pode capturar mais do que 16/27 (aproximadamente 59,3%) da energia cinética do vento (Manwell, 2011). Matematicamente, isso pode ser expresso conforme descrito na Equação 1.

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho AV_0^3} \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $P$  é a potência extraída pela turbina,  $\rho$  é a densidade do ar,  $A$  é a área do rotor e  $V_0$  é a velocidade do vento incidente. A razão para esse limite está na conservação da massa de ar e da energia. À medida que o vento passa pela turbina, a velocidade diminui, criando uma região de baixa pressão

atrás da turbina. Se toda a energia do vento fosse convertida em energia mecânica, o vento seria totalmente interrompido, e isso violaria os princípios da lei de conservação de massa e energia. Portanto, o Limite de Betz representa o máximo teórico de extração de energia sem impedir completamente o fluxo do vento. Com as perdas de eficiência por desgastes mecânicos e arrasto aerodinâmico, os projetistas buscam ao máximo melhorar a eficiência destes sistemas.

Em um sistema de energia eólica, a potência do vento incidente, chamado de  $P_{air}$ , sofre uma perda de energia ao cruzar o plano de rotação do rotor. Essa perda é calculada a partir da Equação 2. (Castro et al., 2010)

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 \quad \text{Eq. 2}$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar e  $A$  é a área de rotação da pá. Quando este vento incide sobre as pás, há uma perda de energia natural do rotor por conta do limite de Betz. Essa perda é obtida através do coeficiente de potência  $C_p$  calculado na Equação 1.

A potência total do sistema é expressa pela Equação 3.

$$P_t = C_p P_{air} \quad \text{Eq. 3}$$

A potência total do sistema, apresentado na Equação 3, não está considerando a eficiência do motor instalado na turbina eólica, que é calculado a partir das especificações técnicas estabelecidas pelo fabricante.

Em um projeto de gerador eólico, a obtenção de uma baixa potência requerida é crucial para maximizar a viabilidade do projeto, gerando uma melhor eficiência energética e reduzindo custo de manutenção, devido à menor carga de trabalho em operação do sistema. A potência requerida é uma relação diretamente proporcional à tração requerida e a velocidade do vento incidente.

A asa é um dispositivo mecânico de comprimento finito cuja seção transversal é formada por aerofólios. No escoamento sobre uma asa há uma diferença de pressão entre o extradorso e o intradorso, que dá origem à sustentação aerodinâmica. Entretanto, devido a esta diferença de pressão, existe um fluxo que “vaza” em torno das pontas da asa, estabelecendo um movimento circular que segue à jusante da mesma, criando um vórtice. (Anderson, 2017)

A tendência do escoamento em rotacional ao redor das bordas das asas gera outro efeito importante: a formação de uma esteira de vórtices a partir das pontas das asas. Os vórtices, por sua vez, induzem a formação de uma componente de velocidade, vertical e para baixo, sobre a asa, chamada de downwash ou velocidade normal induzida.

No caso de uma asa finita, o ângulo  $\alpha$ , formado entre a corda e o vetor velocidade  $V_\infty$ , é definido como ângulo geométrico de ataque. Quando existe a velocidade normal induzida, downwash, o vento relativo local apresenta uma direção inclinada, abaixo da direção de  $V_\infty$ , formando um ângulo  $\alpha_i$ , denominado ângulo de ataque induzido.

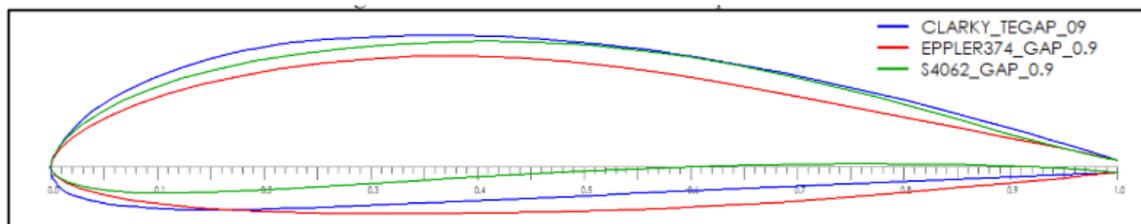
A presença do downwash sobre a asa possui dois efeitos principais sobre a aerodinâmica dela:

- 1) o ângulo real de ataque é o que existe entre a corda e o vento relativo local, sendo denominado de ângulo de ataque efetivo ( $\alpha_{eff}$ ) e apresentando valor inferior ao ângulo de ataque geométrico  $\alpha_g$ , ou seja,  $\alpha_{eff} = \alpha_g - \alpha_i$ ;
- 2) como o vetor sustentação é perpendicular à direção do vento relativo local e, conseqüentemente, inclinado em relação à vertical por um ângulo  $\alpha_i$ , existe uma componente deste vetor na direção de  $V_\infty$ , criando um arrasto denominado arrasto induzido, sendo simbolizado por  $D_i$

O Método BEM, do inglês Blade Element-Momentum Method, baseia-se no fato de que a pá é responsável pela mudança de quantidade de movimento axial do ar que passa por ela, assumindo-se, portanto, que não há interação radial entre os escoamentos das outras pás. Com o Método BEM é possível calcular os parâmetros operativos em regime estacionário de um aerogerador. Como as seções transversais da pá no método BEM não possuem interações com as parcelas adjacentes, essa premissa simplifica bastante os cálculos, porém introduz um erro, visto que as pás do aerogerador possuem envergadura finita.

O gerador eólico necessita de uma força de sustentação alta para seu melhor funcionamento, sendo aconselhado que utilize perfis assimétricos. Foram definidos três perfis adequados para o comparativo de desempenho: Clark Y, Eppler E374 e Selig S4062, que estão sobrepostos e apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Perfis aerodinâmicos sobrepostos.

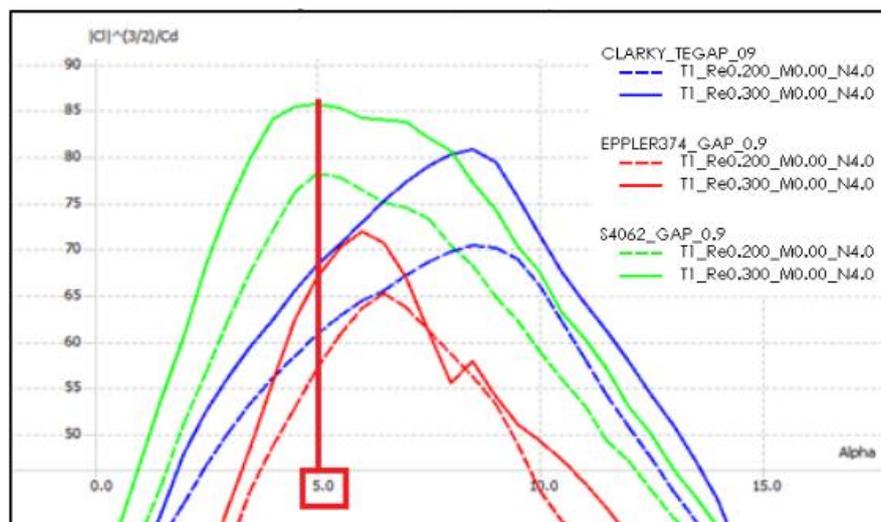


Fonte: Os autores.

### Resultados e Discussão

Para a análise aerodinâmica do perfil, considerou-se número de Reynolds entre 200000 e 300000, visto que o software tem uma limitação que impossibilita realizar análises com o número de Reynolds abaixo deste valor. Considerou-se que a velocidade do vento é de 3m/s. Na Figura 3 apresenta-se a relação  $C_l^{3/2} / C_d$  para diferentes ângulos de ataque ( $\alpha$ ).

Figura 3 – Relação  $C_l^{3/2} / C_d \times \alpha$



Fonte: Os autores.

O desempenho ideal com relação ao ângulo de otimização  $\alpha$ , diz respeito a obtenção do melhor desempenho do sistema, e para isso é necessário obter o menor valor de potência requerida possível, pois ela nada mais é que a quantidade de energia mecânica que o aerogerador necessita para rotacionar as suas pás e gerar energia elétrica. Neste caso, observando a Figura 3, o ângulo de otimização  $\alpha$  ideal para conseguirmos o mínimo de potência requerida é 5,0.

O ponto forte do software QBlade acontece na área de otimização, onde todas as equações integradas ao sistema são colocadas em prática para desenhar um modelo 3D fidedigno. Antes de realizar a otimização do rotor, deve-se primeiro entender três requisitos de projeto: Qual o perfil aerodinâmico será utilizado, qual o diâmetro do rotor e qual a velocidade média do vento onde o gerador será instalado. Neste caso, foi escolhido o perfil Selig S4062 por conta do potencial de eficiência que

ele possui, o diâmetro do rotor será 0,90m e utiliza-se a velocidade média do vento como 3m/s, considerando o vento médio na região de São José dos Campos/SP (Global Wind Atlas, 2023). Os parâmetros necessários para realizar a simulação estão mostrados na Figura 4.

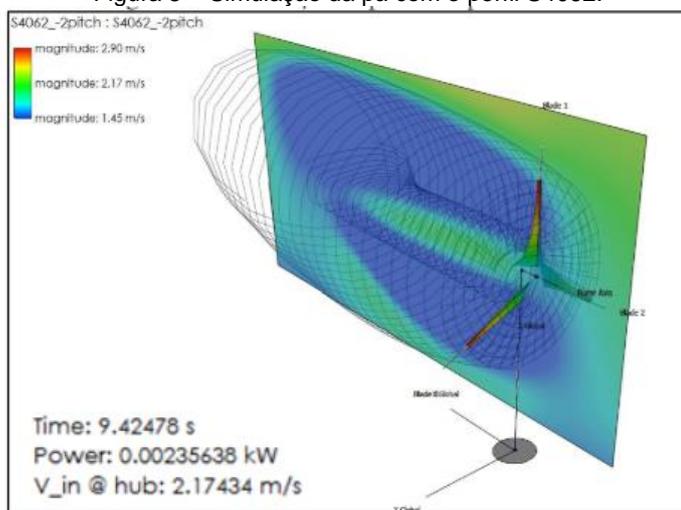
Figura 4 – Parâmetros utilizados na simulação numérica.

The image shows a software interface for configuring turbine parameters. It includes sections for Turbine Type, Turbine Specification, and Turbine Blade. The Turbine Type section has radio buttons for Power Re (None, Pitch 1, Prescr) and Transmiss (Single, 2 Step, Optim, Prescr). The Turbine Specification section contains input fields for Generator Cap (0.0168 kW), V Cut In (0.5 m/s), V Cut Out (10 m/s), Rot. Speed Mi (0.00001 rpm), Rot. Speed Mz (320 rpm), TSR at Design (5), Fixed Pitch (0 deg), Loss Factor (0.16), and Fixed Losses (0 kW). The Turbine Blade section has a dropdown menu set to S4062\_-2pitch.

Fonte: Os autores.

O resultado da simulação numérica está apresentado na Figura 5. Observa-se que a região mais avermelhada significa que o vento incidente nas pás não tem perdas, ou seja, não há captação de energia nesta região, a velocidade que está chegando ao rotor, permanece a mesma. A região mais azulada, significa que o vento diminuiu sua velocidade até 50%, causando uma retenção de energia de toda sua energia cinética. Ou seja, dos 3 m/s que chegaram até a turbina, somente 50% desta velocidade atravessa a área do rotor.

Figura 5 – Simulação da pá com o perfil S4062.

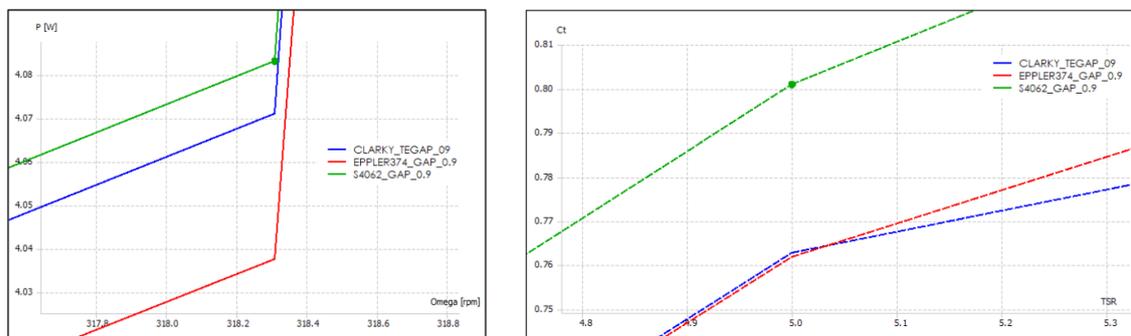


Fonte: Os autores.

A potência elétrica gerada foi maior pelo perfil Selig S4062, sendo de 4,085W, ligeiramente maior que o Clark Y, que gerou 4,071W. O perfil Eppler E374 ficou atrás dos outros, com 4,037W, conforme Figura 6 a). Essa mesma potência, se colocada em relação à velocidade do vento, estão menores que o real, pois quando o fluxo de ar chega próximo do rotor, sofre uma diminuição da velocidade

com o efeito da vorticidade, perdendo cerca de 27% da sua energia. Nas mesmas condições de TSR que os outros perfis, o Selig S4062 conseguiu ter um coeficiente de tração  $C_t$  de 0,801, gerando uma quantidade de empuxo significativamente maior que os outros, conforme Figura 6 b).

Figura 6 – Resultados da simulação numérica.



Fonte: Os autores.

## Conclusão

Este projeto revela não apenas avanços significativos no entendimento do assunto, mas também destaca a experiência enriquecedora dos envolvidos. Embora desafiadora, a energia eólica é uma realidade e não mais uma promessa. A utilização do software QBlade proporcionou de forma muito assertiva e intuitiva, uma introdução muito acessível ao campo da aerodinâmica eólica. A capacidade de simular diferentes condições operacionais, otimizar modelos 3D e analisar o comportamento de características aerodinâmicas, permitiu que a curva de aprendizado ao tema fosse muito mais tranquila, fazendo com que desafios complexos tivessem resoluções mais claras. Além disso, a pesquisa ressalta a importância de ferramentas computacionais acessíveis para incentivar a participação de estudantes no campo da energia renovável. Os melhores perfis aerodinâmicos usado nos rotores são perfis com baixo número de Reynolds, por conta da baixa velocidade do vento nestas condições, diferente por exemplo de uma aeronave, que opera em velocidades acima dos 800km/h.

## Referências

- ANDERSON, J. D. **Fundamentals of Aerodynamics**. New York, Ny: Mcgraw Hill Education, 2017.
- CASTRO, D. E. et al. **Análise das Perdas de Eficiência Produtiva em Sistemas de Geração de Energia Eólica**. Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 21 out. 2010.
- GLOBAL WIND ATLAS. **Global Wind Atlas**. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/en>. Acesso em: 06 mai. 2023.
- HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of wind turbines**. New York, Ny: Routledge, 2008.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained: theory, design and application**. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- WENZEL, G. M. **Projeto Aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal**. Trabalho de Conclusão de Curso - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUCRS: 2007. p. 1-76.