

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

PRINCÍPIOS BÁSICOS DA AERODINÂMICA DO FUNCIONAMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA DE DARRIEUS

Alane Farias dos Santos, alanefarias9@gmail.com¹

Marcus Vinícius Sousa Rodrigues, marcus@ufersa.edu.br¹

Leonardo Magalhães Xavier Silva, leonardomxs@ufersa.edu.br¹

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Rua: Gamaliel Martins Bezerra, Nº 578. Bairro: Alto da Alegria, Angicos/RN. 59515-000.

Resumo: A energia eólica é a energia proveniente da circulação do ar na atmosfera, provocada pelo aquecimento desigual da Terra, corresponde a um tipo de energia limpa e renovável que pode ser facilmente produzida em todos os lugares. A conversão de energia cinética dos ventos em eletricidade é feita através de turbinas eólicas. Essas turbinas são classificadas em dois tipos: turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), que apresentam rotor de eixo horizontal e possuem grande eficiência e rendimento, por isso são utilizadas para produção de energia em larga escala, e as turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV), com rotor de eixo vertical. Atualmente, as turbinas têm despertado o interesse dos fabricantes para a sua aplicação na geração de eletricidade em pequena escala. A principal máquina vertical é o rotor Darrieus, que apresenta uma estrutura de pás (geralmente duas ou três) com curvatura em forma de catenária. O objetivo principal deste artigo consiste em descrever os princípios básicos da aerodinâmica do funcionamento de uma turbina de Darrieus, caracterizando as principais vantagens e desvantagens do uso desse dispositivo para conversão de energia eólica em energia elétrica.

Palavras-chave: Aerodinâmica, Sistemas eólicos, Rotor Darrieus, Energia eólica.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação das energias consideradas renováveis, para geração de energia elétrica, tais como a energia eólica, só desenvolver-se a partir da crise petrolífera nos anos 1970. (HAMDAN et al., 2014). O esgotamento dos recursos energéticos fósseis tem favorecido o crescimento em todo o mundo do uso de energias ditas renováveis, como a energia eólica.

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada na Dinamarca, no ano de 1976. Na atualidade, existem dezenas de milhares de turbinas eólicas em operação no mundo, tanto em escala industrial como para aplicações domésticas. Destacam-se nesse cenário a Alemanha, Espanha e Estados Unidos. Em grande parte, o aumento do interesse nessa forma de energia decorre do incremento da eficiência dos aerogeradores. (NEUMEISTER & SILVA, 2013).

Mediante a presente conjuntura de expansão da implantação de parques eólicos, o escopo deste artigo descreve os princípios básicos da aerodinâmica envolvidos no funcionamento de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus, por tratar-se de uma variação eficaz para pequenas demandas. Serão reportadas, então, as principais vantagens e desvantagens no uso deste equipamento como fonte de conversão de energia eólica em energia elétrica. Para isso, a pesquisa bibliográfica buscou trabalhos relevantes e atuais para fundamentar a abordagem do tema.

2. SISTEMA CONVERSOR DE ENERGIA EÓLICA

2.1 Potência extraída do vento e torque

A potência pode ser definida como a razão pela qual a energia é usada ou convertida por unidade de tempo. A energia contida no vento é a energia cinética, devido à movimentação das massas de ar na atmosfera.

Com a rotação, as pás da hélice criam um efeito aerodinâmico, a partir do escoamento do ar na estrutura, como o da sustentação da asa. O deslocamento circular da pá no ar provocará uma baixa pressão no dorso da pá, e uma alta pressão na face, provocando a tração. O vento é apresentado uma velocidade de aproximação V_1 e uma velocidade de esteira V_2

menor a jusante da hélice. Conforme Gasch & Tvele (2012), a turbina eólica tem como energia disponível, a energia cinética proveniente de uma coluna de ar que escoar a uma velocidade constante e uniforme, V_1 .

É possível mostrar, por meio da Equação de Bernoulli para escoamentos incompressíveis, permanentes e sem viscosidade, que a velocidade através das hélices da turbina, V , é uma média aritmética das velocidades do vento V_1 e da esteira mais afastada V_2 .

O vento ao passar pelo disco, formado pela rotação das hélices (ou pás) da turbina, favorece a extração de potência pela turbina, dada por:

$$\dot{W}_{\text{ext}} = F V \quad (1)$$

em que $\dot{W}_{\text{ext}}$ é a potência extraída do vento pelas hélices e F é a força horizontal atuando em seu suporte, necessária para manter a rigidez das hélices durante a extração de potência. A expressão que indica a potência extraída pelas hélices de uma turbina eólica é dada por:

$$\dot{W}_{\text{ext}} = \frac{1}{4} \rho A (V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2) \quad (2)$$

Para uma dada velocidade V_1 , é possível mostrar que a potência máxima extraída, $\dot{W}_{\text{máx}}$ ocorre quando $V_2 = V_1/3$, sendo dada por:

$$\dot{W}_{\text{máx}} = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 \quad (3)$$

Para Hansen (2008), a equação da potência máxima disponível é muito importante, uma vez que a mesma mostra que essa potência aumenta com o cubo da velocidade do vento e só aumenta linearmente com a massa específica do ar.

A potência disponível total para a hélice, $\dot{W}_{\text{disp}}$, é o produto entre a vazão mássica através da hélice e a energia cinética total do vento,

$$\dot{W}_{\text{disp}} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (4)$$

Vale salientar que a expressão em (4) representa toda a energia disponível pelo vento para a turbina eólica. Entretanto, se toda essa energia fosse extraída pelas hélices, o que representa uma velocidade nula para esteira afastada, o princípio da conservação de massa seria violado. Neste caso, somente um percentual dessa energia em (4) será absorvida pelo rotor da turbina eólica.

O coeficiente de potência ou o rendimento do rotor eólico, C_p , pode ser definido como a razão entre a potência extraída do vento, $\dot{W}_{\text{ext}}$, (ou seja, a potência fornecida pelo vento) e a potência total disponível, $\dot{W}_{\text{disp}}$, em uma área equivalente à área varrida pelo rotor. Isto é,

$$C_p = \frac{\dot{W}_{\text{ext}}}{\dot{W}_{\text{disp}}} \quad (5)$$

Esse coeficiente pode ser entendido como a relação entre a potência mecânica do conversor eólico e a potência contida no vento. Geroto (2012), afirma que o desempenho aerodinâmico de uma turbina eólica é dado em função do coeficiente C_p , que mostra o quanto a turbina pode extrair do vento ao seu redor.

Segundo Neumeister & Silva (2013), o rendimento de um gerador eólico depende, inicialmente, do desenho do rotor e da velocidade de rotação, mas na prática é impossível construir geradores eólicos capazes de operar como o mesmo rendimento em todas as velocidades.

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (5) é possível escrever a seguinte expressão para a potência extraída:

$$\dot{W}_{\text{ext}} = \frac{1}{2} C_p \rho A V_1^3 \quad (6)$$

O coeficiente de potência máximo, $C_{p,\text{máx}}$, é definido por:

$$C_{p,\text{máx}} = \frac{\dot{W}_{\text{máx}}}{\dot{W}_{\text{disp}}} \quad (7)$$

e indica a potência máxima, $\dot{W}_{\text{máx}}$, que pode ser extraída de uma turbina eólica.

Substituindo as Eq. (3) e (4) na Eq. (7), é possível obter o seguinte resultado:

$$C_{p,m\acute{a}x} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (8)$$

Esse número, dado em (8), é conhecido como número de Betz e indica o rendimento ideal (isento de atrito) que uma turbina eólica pode obter. Em outras palavras, o que esse fator diz é que a potência máxima que pode ser extraída do vento é aproximadamente 59,3% da potência total disponível do vento. Entretanto, segundo Sharma & Patel (2015), na prática as turbinas eólicas modernas apresentam um rendimento em torno de 40%.

Sempre que a turbina eólica extrai potência do vento, um torque T é gerado, dado por:

$$T = \frac{\dot{W}_{ext}}{\omega} \quad (9)$$

em que ω é a rotação do rotor. Substituindo a Eq. (6) na Eq. (9), é possível escrever o seguinte resultado para o torque gerado:

$$T = \frac{1}{2\omega} C_p \rho A V_1^3 \quad (10)$$

Tesch et al. (2015), ressalta que usualmente o coeficiente de potência e o torque de uma turbina eólica podem ser expressos em função da razão de velocidade λ (definida como a razão entre a velocidade tangencial, e a velocidade do vento não perturbado, V_1). Isto é,

$$\lambda = \frac{\omega D}{2V_1} \quad (11)$$

onde D é o diâmetro do rotor eólico da turbina.

O coeficiente de torque C_t é definido pela seguinte expressão:

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (12)$$

Logo, por intermédio das equações (11) e (12), é possível escrever a seguinte expressão para o torque gerado:

$$T = \frac{1}{4} C_t \rho A V_1^2 D \quad (13)$$

É importante ressaltar que rotores eólicos com várias pás apresentam elevados torques, enquanto que os rotores com poucas pás apresentam baixos torques.

2.2 Os fundamentos de aerodinâmica

A aerodinâmica pode ser entendida como o estudo do movimento do ar, relativo às suas propriedades e características, e às forças que exercem em corpos sólidos neles imersos, tais como as pás de uma turbina eólica. Para esse equipamento, a força resultante sobre a pá irá depender da velocidade do vento relativo, das dimensões da pá e das propriedades do ar (a massa específica ρ e a viscosidade dinâmica μ).

As principais propriedades de um rotor eólico de um aerogerador dependem da força resultante sobre as pás, que são descritas pela teoria dos aerofólios. Segundo Da Rosa, (2006) as forças que atuam sobre um perfil são caracterizadas pelas componentes da força resultante da distribuição de pressão, na direção normal ao movimento (vento relativo) e na direção do movimento. A primeira gera sustentação, e a segunda gera o arraste aerodinâmico. A força resultante age no centro de pressão do perfil aerodinâmico.

Um aerofólio (ou perfil aerodinâmico) pode ser definido como a seção bidimensional transversal de uma pá, conforme ilustrado na Fig. 1. O ângulo que a pá de um aerogerador faz com a direção do vento, medido com relação a uma linha de referência (chamada de linha de corda) na pá, é chamado de ângulo de ataque α . A linha de corda é a linha é uma linha que une as bordas de ataque e de fuga. O comprimento dessa linha é comumente chamado de corda.

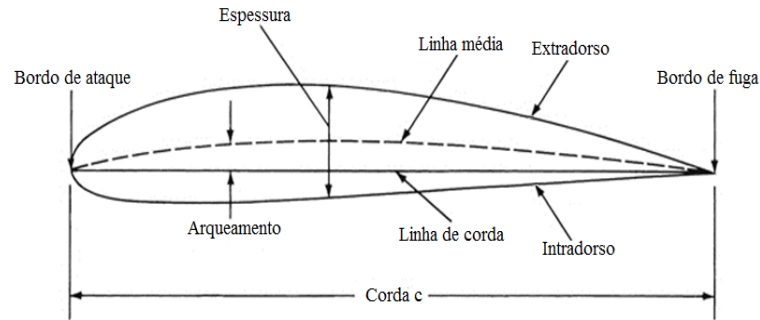


Figura 1 - Nomenclatura de um aerofólio. Fonte: Anderson Jr., 2015.

Segundo a Fig.1, a superfície superior do aerofólio é chamada de extradorso, acima da qual está a região de baixa pressão, enquanto, a superfície inferior é chamada de intradorso, abaixo da qual está a região de alta pressão. O local dos pontos intermediários entre o extradorso e o intradorso é definido como a linha média – onde está localizado o centro aerodinâmico do aerofólio. Por fim, define-se a distância máxima entre a linha média e a linha de corda, mensurada perpendicularmente, o arqueamento.

A força resultante pode ser decomposta em duas componentes: uma na direção do movimento, chamada de força de arrasto, e outra perpendicular à direção do movimento, chamada de força de sustentação. Na Figura 3 é possível observar as forças de arrasto, indicada por F_D , e de sustentação, indicada por F_L , de acordo com a direção do fluxo.

Destaca-se ainda que a dedução analítica das forças aerodinâmicas de arrasto e de sustentação, por meio da integração das tensões sobre a superfície de um corpo, é uma tarefa muito difícil. Nesse cenário, a simulação computacional fluidodinâmica- CFD, que soluciona um conjunto de equações diferenciais não lineares através de técnicas numéricas iterativas, pode aliar-se aos métodos experimentais realizados em túneis de vento, de modo a determinar a magnitude das forças atuantes. É importante salientar que o fluxo de vento ao redor de uma pá é governado por equações diferenciais parciais – equações de Navier-Stokes.

Para Wendt (2009), CFD pode ser entendida como a arte de substituir as equações diferenciais do campo de escoamento de um fluido por um sistema de equações algébricas, obtendo assim uma descrição aproximada do campo de escoamento. Por conseguinte, as forças aerodinâmicas são descritas por meio de coeficientes adimensionais.

Os coeficientes adimensionais de arrasto, C_D , e de sustentação, C_L , são definidos, respectivamente, pelas seguintes expressões:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_r^2 A_p} \quad (14)$$

e

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V_r^2 A_p} \quad (15)$$

em que V_r é a velocidade do vento resultante e A_p é a área planiforme da pá.

Quando as pás de uma turbina eólica estão em movimento rotacional, a velocidade do vento resultante é a soma vetorial da velocidade do vento incidente V_1 , perpendicular ao plano de rotação, com a velocidade do vento resistente (velocidade da pá) V_{tan} , paralelo ao plano de rotação. Desta forma,

$$V_r = V_1 + V_{tan} \quad (16)$$

Na Figura 2, além do ângulo de ataque α , é possível definir o ângulo de passo β , como o ângulo formado entre o plano de rotação e a corda do aerofólio. É possível também ver que a soma dos ângulos de ataque e de passo, $\alpha + \beta$, é o ângulo em que a velocidade V_r faz com o plano de rotação.

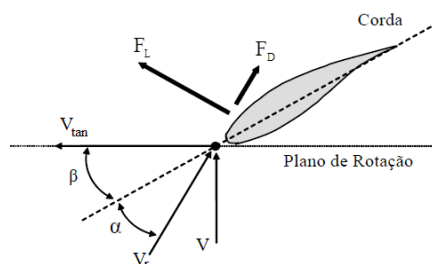


Figura 2 - Representação da velocidade do vento resultante e das forças aerodinâmicas. Fonte: Marques, 2004.

É possível observar que os coeficientes C_L e C_D são características do formato do aerofólio a partir de seu ângulo de ataque α . De posse dos coeficientes C_D e C_L , é possível determinar as forças de arrasto e de sustentação, respectivamente, pelas seguintes expressões:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V_r^2 A_p \quad (17)$$

e

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V_r^2 A_p \quad (18)$$

Por fim, a magnitude força resultante F_R pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$F_R^2 = F_D^2 + F_L^2 \quad (19)$$

As antigas máquinas eólicas operaram essencialmente com arrasto aerodinâmico, alcançando coeficientes de potência de aproximadamente 0,3. Entretanto, as turbinas modernas podem chegar a coeficientes de potência de 0,5, o que demonstra a superioridade do princípio de sustentação aerodinâmica.

2.3 Turbinas eólicas de eixo vertical

Conforme Shamshirband et al. (2014), a energia cinética do vento captada pelo aerogerador é função da velocidade do vento, da massa específica do ar, da área de varredura das pás e ainda da altura em que o rotor está instalado.

As pás podem ser consideradas como a parte mais importante do rotor. Portanto, o tamanho das pás (consequentemente, o diâmetro do rotor) está diretamente relacionado ao desempenho de um aerogerador (PIRES & OLIVEIRA, 2010).

A interação entre as pás de um aerogerador com os ventos que passam através da área do rotor deve ser a maior possível, de modo que a extração de potência seja tão eficiente quanto possível.

A conversão de energia em uma turbina eólica segue as seguintes duas etapas:

- 1) Primeiramente no rotor, em que parte da energia cinética disponível é convertida em energia mecânica.
- 2) Em seguida no gerador elétrico, que recebe a energia mecânica e converte parte dessa energia em eletricidade, que é então transmitida para a rede concessionária.

É importante ressaltar que a quantidade de energia gerada em uma turbina eólica depende dos seguintes fatores: a quantidade de vento que passa pela turbina; o diâmetro do rotor; o tipo de perfil das pás; e, o rendimento de todo o sistema.

A maioria das turbinas eólicas utilizadas nos parques eólicos, para converter energia eólica em energia elétrica, apresenta eixo de rotação horizontal. Entretanto, segundo Hamdan et al. (2014), somente recentemente as TEEVs têm sido usadas para a produção de eletricidade em larga escala, principalmente nos Estados Unidos.

Mohamed et al. (2015), destaca o fato de que as TEEVs tem despertado atualmente o interesse dos fabricantes de aerogeradores para o seu uso na geração de energia em pequena escala. Conforme Jin et al. (2015), as TEEVs apresentam as seguintes vantagens tecnológicas, quando comparadas às TEEHs:

- a) Requer um custo de produção muito mais baixo.
- b) Pode absorver a energia do vento em todas as direções, sem a necessidade de um sistema de guinada das pás.
- c) Produz baixo nível de ruído – devido à baixa rotação.
- d) Opera em segurança até mesmo sob ventos de alta velocidade.

Nas turbinas de eixo vertical, a montagem do gerador e a caixa de velocidades (quando aplicável), pode ser feita na base do eixo de rotação que se encontra ao nível do solo. Esta é a maior vantagem da sua configuração, pois facilita as operações de montagem e manutenção. Deste modo, o centro de gravidade do equipamento também fica mais baixo, o que permite que se utilizem estruturas de suporte flutuantes mais simples em aplicações offshore.

Conforme as forças aerodinâmicas de rotação, as TEEVs são classificadas em duas categorias: as máquinas de arrasto e as máquinas de sustentação. Em relação às turbinas eólicas que são movidas por sustentação aerodinâmica, a mais típica é a turbina de Darrieus (ou rotor de Darrieus). Esse rotor apresenta preferencialmente duas ou três pás curvas que se apresentam em forma de uma curva em catenária. Segundo Johnson (2001) uma das principais desvantagens dessas turbinas é que elas necessitam de um motor de partida, uma vez que apresentam deficiência em sua inicialização. Essa partida é, geralmente, dada por um motor de indução ligado à rede elétrica.

A turbina de Darrieus pode ser considerada como o modelo de TEEV mais avançada em tecnologia. Centenas de unidades estão instaladas em parques eólicos em nos Estados Unidos e no Canadá, e pesquisas de ponta vêm sendo desenvolvidas em todo o mundo, em especial na Alemanha, França e Espanha (FADIGAS, 2011).

Nos últimos anos tem aumentado o interesse dos pesquisadores em aplicações envolvendo turbinas eólicas para geração de eletricidade em centros urbanos. O projeto de turbinas em ambiente urbano representa um grande desafio, uma vez que os ventos nesse ambiente são caracterizados por mudanças frequentes e rápidas nas suas direções. Assim,

as TEEVs oferecem uma grande vantagem, uma vez que as mesmas não necessitam de sistema de guinada das pás (SCHEURICH & BROWN, 2013).

3. TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DO TIPO DARRIEUS

3.1 Principais componentes de uma turbina Darrieus

Segundo Pinto (2014), a única máquina de eixo vertical que teve algum sucesso comercial é o rotor Darrieus, nomeada assim devido ao seu inventor Georges Jean Marie Darrieus (1888-1927). Na Figura 3, tem-se uma ilustração de uma turbina eólica de Darrieus com a nomenclatura de seus principais componentes.

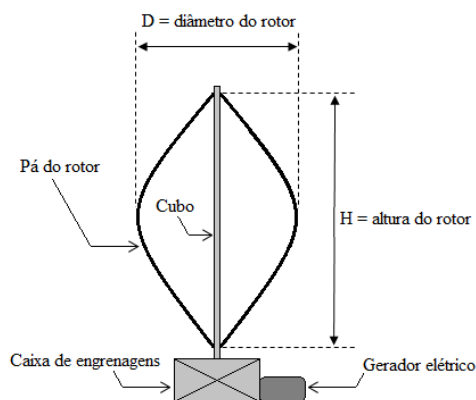


Figura 3 - Elementos de uma turbina Darrieus. Fonte: Elaboração do autor, 2015.

Conforme ilustrado na Fig. 3, as pás curvas desse modelo se apresentam atadas nos extremos do cubo (com um comprimento H). Assim, durante a rotação, as pás são deformadas por meio da força centrífuga até um diâmetro D, assumindo uma forma de uma curva catenária. Segundo Melo (2013), essa configuração especial das pás de uma turbina Darrieus é denominada *Troposkien*, o que minimiza a tensão sobre as pás.

As máquinas eólicas, como o rotor de Darrieus, apresentam a finalidade de gerar energia elétrica a partir de baixas velocidades de rotação. E neste caso, é necessário o uso de uma caixa multiplicadora de velocidade (caixa de engrenagens) para conectar ao gerador elétrico, que apresenta velocidade de rotação bem superior ao eixo da turbina.

Desta forma a transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, tem por finalidade transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador elétrico, sendo compostas por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos. O gerador transforma a energia mecânica de rotação em energia elétrica através de equipamentos de conversão eletromecânica. Essa energia é gerada devido a rotação em alta velocidade do eixo de rotação.

Como a carga nas pás oscila fortemente, isso resulta, especialmente para um rotor de duas pás, em fortes cargas flutuantes sobre a torre e a fundação. Essas turbinas usam, ao invés de grandes torres, cabos para proporcionar a sua estabilidade estrutural. Desta forma, apresentam alturas menores do que as TEEVs, favorecendo assim um custo menor de projeto.

A pá de uma turbina eólica pode ainda ser entendida como um motor a vento, cuja quantidade de energia produzida depende principalmente do seu diâmetro e da quantidade de vento. Em geral, as pás de uma turbina de Darrieus são construídas com perfis NACA, os mesmos usados em asas de avião, simétricos, por se mostrarem adequados para um bom desempenho. Ressalta-se o fato de que nos aerofólios simétricos a linha média e de corda são coincidentes e o arqueamento do perfil é nulo.

Segundo Melo (2013), a turbina do tipo H funciona com uma turbina de Darrieus, porém apresentando pás retas e com aerofólios constantes ao longo de sua extensão.

O fato de esse rotor apresentar pás com perfis aerodinâmicos constantes torna a análise dessa turbina bem menos complexa do que o rotor de Darrieus com pás deformadas. É importante salientar que essa variação da turbina de Darrieus apresenta elevado torque de partida e maior eficiência operando em ventos turbulentos quando comparada às turbinas de Darrieus originais.

Por fim, como uma turbina de Darrieus possui torque de partida muito baixo, geralmente exige uma fonte externa adicional para a sua partida inicial, como um motor elétrico ou um rotor Savonius (como nos modelos híbridos). Assim, um modelo híbrido utiliza um rotor de Savonius (uma máquina de arrasto) com mecanismo de partida para o rotor de Darrieus. Segundo Mohamed et al. (2015), os sistemas híbridos foram estudados de modo a verificar a capacidade de auto partida da turbina de Darrieus.

Alternativamente, pode-se usar um motor elétrico que coloca o rotor de Darrieus em movimento até que o torque aerodinâmico seja capaz de por o sistema em rotação. A partir do momento em que o rotor entra em rotação esse motor passa a funcionar como gerador elétrico (PASSOS, 1984).

3.2 Aerodinâmica do funcionamento de uma turbina de Darrieus

Quando um rotor de Darrieus gira, os aerofólios avançam no ar em um percurso circular, conforme ilustrado na Fig. 4. Conforme Jin et al. (2015), o torque gerado nesse movimento é positivo.

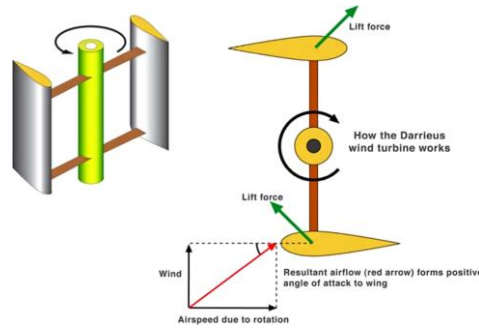


Figura 4 - Turbina de Darrieus em operação. Fonte: Jin et al, 2015.

Assim, a turbina de Darrieus tem como base o princípio da variação cíclica de incidência. Ou seja, um aerofólio colocado ao vento de acordo com o ângulo de ataque fica submetido às forças aerodinâmicas de intensidades e direções variáveis. Vale salientar que a rotação dessa turbina é devido a um binário motor gerado pela resultante dessas forças.

Para um rotor Darrieus girar é necessário que a força aerodinâmica resultante na direção tangencial à trajetória da pá, F_T , seja positiva. Para mostrar esse fato considere agora a trajetória de um elemento de pá, conforme ilustrado na Fig. 5.

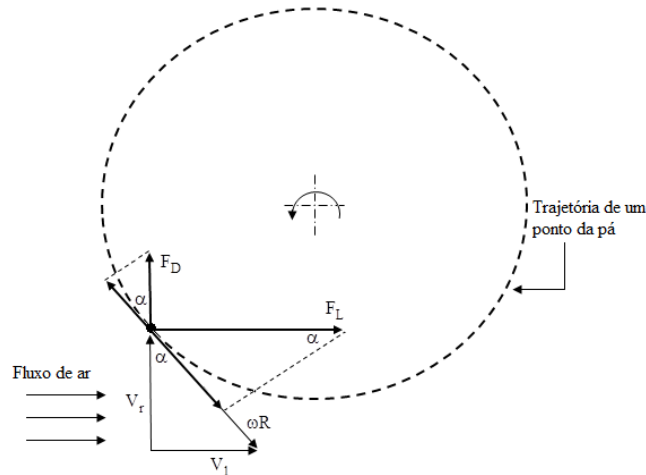


Figura 5 - Forças aerodinâmicas atuando sobre um elemento de pá. Fonte: Elaboração do autor, 2015.

É possível observar que o fluxo de ar, com velocidade V_1 , ao se aproximar do elemento de pá em rotação, com velocidade tangencial, resulta em um movimento relativo, com velocidade V_r , que é a soma vetorial das velocidades. Então, de acordo com a geometria da figura a cima, é possível escrever o seguinte resultado:

$$F_T = F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha \quad (20)$$

Assim, conforme a Eq. (20), para que F_T seja maior do que zero, é necessário que:

$$F_L \sin \alpha > F_D \cos \alpha \quad (21)$$

o que implica que o rotor de Darrieus é uma máquina eólica movida por sustentação aerodinâmica. Da Eq. (21), é possível escrever:

$$\frac{F_L}{F_D} > \frac{1}{\tan \alpha} \quad (22)$$

Substituindo as Eq. (17) e (18) na Eq. (19), é possível escrever a força tangencial da seguinte forma alternativa:

$$F_T = \frac{1}{2} C_T \rho V_r^2 A_p \quad (23)$$

em que C_T é o coeficiente da força tangencial, dado por:

$$C_T = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (24)$$

Segundo Passos (1984), para obter rotores de Darrieus com elevado desempenho torna-se vital a escolha de aerofólios com alta relação sustentação/arrasto, indicada pela razão C_L/C_D . É importante ressaltar que as forças aerodinâmicas de arrasto e de sustentação dependem não só do formato do aerofólio, mas também do número de Reynolds e do ângulo de ataque α .

O ângulo de ataque proporciona um aumento da força de sustentação até certo ponto em que a mesma cai abruptamente. Este ponto é conhecido como estol. Para a maioria dos perfis, esse ângulo crítico oscila em torno de 15° .

Observa-se assim que uma fraca performance aerodinâmica pode ocorrer para baixas razões de velocidades devido ao estol e também para pequenos ângulos de ataque. Mas, por razão totalmente diferente, neste caso a razão L/D tende a zero juntamente com o ângulo de ataque, ficando o desempenho ótimo para ângulos de ataque um pouco abaixo do ângulo de estol (BRAGA, S. L., 1981).

Conforme Passos (1984), os coeficientes aerodinâmicos C_L e C_D em função do ângulo de ataque dependem ainda das dimensões das pás, representada pelo seguinte parâmetro adimensional, chamado razão de aspecto da pá, indicada por AR e definida por:

$$AR = \frac{L}{c} \quad (25)$$

em que L é o comprimento da pá e c é a corda do aerofólio da pá. É importante salientar que a razão sustentação/arrasto aumenta à medida que é aumentada a razão de aspecto da pá.

Quando o limite de operação do rotor é ultrapassado, o fenômeno de estol causa uma oscilação aerodinâmica no funcionamento do rotor. Em baixas rotações têm-se ângulos de ataque muito grandes, acima do ponto de estol, tem-se que a força tangencial F_T passa a não produzir torque de partida.

Devido ao estol à baixas razões de velocidades, a força tangencial média pode ser negativa, isto implica que a turbina Darrieus não parte do repouso. Para tal, deve-se instalar um dispositivo auxiliar para dar partida ao sistema. Um motor auxiliar, por exemplo, acrescenta muito pouco custo ou complexidade ao maquinário acoplado ao eixo de uma turbina de grande porte. Para turbinas menores um rotor impulsinado basicamente pela força de arrasto, fixo ao eixo central, pode ser usado como “starter” por possuir boas características de torque à baixas velocidades relativas (BRAGA, S. L., 1981).

O número de Reynolds em um projeto de pá de uma turbina de Darrieus pode ser calculado em relação à corda da pá da seguinte forma:

$$Re_c = \frac{\rho V_r c}{\mu} \quad (26)$$

em que c é o comprimento de corda do aerofólio.

Conforme Passos (1984), em cada rotação ter-se-ia que considerar diversos valores de Re_c pois V_r depende da posição da pá e da inclinação desta. Uma alternativa à Eq. (26) para calcular o número de Reynolds seria usar a velocidade tangencial ao invés da velocidade resultante. Assim, o número de Reynolds é dado por:

$$Re_c = \frac{\rho \omega D c}{2\mu} \quad (27)$$

Além do número de Reynolds, outro parâmetro muito importante a ser considerado no projeto de uma turbina eólica é a razão de velocidades λ , definida na Equação (11), também chamada de razão de velocidade da ponta de pá ou TSR (sigla em inglês de *tip speed ratio*). Se o rotor da turbina eólica gira muito lentamente (baixos valores para a razão λ), a maior parte do vento atravessa as pás do rotor sem ser perturbado. Entretanto, se o rotor gira muito rapidamente (elevados valores para λ), as pás em rotação se assemelham a uma parede sólida para o vento.

Assim, segundo Sarathi et al. (2012), a turbina eólica de Darrieus deve ser projetada com uma razão de velocidade de ponta de pá que possibilite uma maior interação de suas pás com o vento, possibilitando extrair o máximo de potência do vento.

A solidez de um rotor eólico, σ , dá a ideia de quanto da área varrida é ocupada pelas pás, sendo definida como a razão entre a área real das pás e a área varrida pelas pás em rotação.

Segundo Carrigan et al. (2012), para uma TEEV a solidez σ é definida pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{N c}{D} \quad (28)$$

em que N é o número de pás, c é o comprimento de corda do aerofólio e D é o diâmetro do rotor.

É importante salientar que a solidez define a geometria da turbina de Darrieus. Assim, definido a geometria, σ , e escolhido a velocidade, λ , o passo seguinte consiste em prever o desempenho do rotor, por intermédio do cálculo das forças aerodinâmicas de arrasto e de sustentação (CARRIGAN, et al., 2012).

As turbinas que trabalham com o princípio de sustentação normalmente trabalham com valores de solidez baixos, entre 0,10 e 0,35 para rotores Darrieus clássicos e entre 0,20 e 0,5 para rotores de pás retas como os H-Darrieus (DIAZ, D. A.G., 2012).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resumo, diante do exposto neste trabalho, é possível elencar as seguintes características de uma turbina eólica de Darrieus:

- 1) A configuração de suas pás permite uma interação com ventos de qualquer direção, sem orientação.
- 2) A construção da sua torre é bem mais econômica.
- 3) É uma máquina-motriz movida por sustentação aerodinâmica.
- 4) Necessita de um motor de partida.
- 5) Apresenta, relativamente, altas rotação e eficiência.

Pode-se afirmar que devido à simplicidade envolvida no projeto de uma turbina de Darrieus, associada ao seu baixo custo fabricação e montagem, faz com a mesma seja uma forte candidata para o uso na produção de energia elétrica, tanto em larga como em pequena escala.

É importante salientar que muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de obter um modelo matemático que descreva o funcionamento da turbina de Darrieus.

Assim, o estudo deve ser incentivado de modo a desenvolver modelos de rotores de Darrieus que apresentem melhores coeficientes de potência, garantindo assim melhores desempenhos dessas máquinas para conversão da energia eólica em eletricidade.

Por fim, o presente artigo apresenta um caráter acadêmico, podendo ser usado como material introdutório ao estudo das turbinas eólicas de eixo vertical e do seu funcionamento aerodinâmico.

5. REFERÊNCIAS

- ANDERSON JR., J. D. “Fundamentos de engenharia aeronáutica”. 7ª edição. Porto Alegre – RS: AMGH Editora Ltda, 2015.
- CARRIGAN, T. J.; DENNIS, B. H.; HAN, Z. X.; WANG, B. P. “Aerodynamic shape optimization of a vertical-axis wind turbine using differential evolution”. International Scholarly Research Network, Volume 2102.
- DA ROSA, E.; “Projeto aeronáutico – Uma introdução a competição SAE Aerodesign”. Florianópolis, UFSC/GRANTE, 2006.
- DIAZ, D. A.G. “Estudo de turbina eólica vertical com ângulo de pá variável”. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2012.
- FADIGAS, E. A. F. A. “Energia eólica”. Barueri – SP: Editora Manoele Ltda, 2011.
- GASCH, R.; TWELE, J. “Wind power plants: Fundamentals, design, construction and operation”. Second Edition. USA: Springer, 2012.
- GEROTO, G. H. R. “Avaliação do desempenho de um aeromotor de eixo vertical”. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá – SP, 2012.
- HAMDAN, A.; MUSTAPHA, F.; AHMAD, K. A.; MOHD RAFIE, A. S. “A review on the micro energy harvester in structural health monitoring (SHM) of biocomposite material for vertical axis wind turbine (VAWT) system: A Malaysia perspective”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 35, 23-30, 2014.
- HANSEN, M. O. L. “Aerodynamics of wind turbines”. Second edition. USA: Earthscan, 2008.
- JIN, X.; ZHAO, G.; GAO, K.; JU, W. “Darrieus vertical axis wind turbine: Basic research methods”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 42, 212-225, 2015.
- JOHNSON, G. L. “Wind energy systems”. Electronic Edition. Manhattan, KS, 2001.
- MARQUES, J. “Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação”. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2004.
- MELO, R. R. da S. “Formulações integral e diferencial aplicadas à análise de escoamentos sobre rotores eólicos”. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2013.
- MOHAMED, M. H.; ALI, A. M.; HAFIZ, A. A. “CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind”. Engineering Science and Technology, an International Journal, 18, 1-13, 2015.
- NEUMEISTER, R. F.; SILVA, C. V. da. “Análise do escoamento sobre uma turbina eólica vertical usando CFD”. Revista Perspectiva, Vol. 38, nº 142, pp. 127-138, 2014.
- PASSOS, J. C. “Rotor eólico Darrieus: Um estudo experimental”. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 1984.
- PINTO, M. de O. “Fundamentos de energia eólica”. Rio de Janeiro – RJ: LTC editora, 2014.

- PIRES, J. C.; OLIVEIRA, B. F. “Modelagem e simulação virtual de pá para aerogerador de pequeno porte”. Revista Design & Tecnologia, Vol. 2, pp. 69-76, 2010.
- SARATHI, Y.; PATEL, K.; TIRKEY, A.; KUMAR SEN, P.; SHARMA, R. “Study on wind turbine and its aerodynamics performance”. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 4, nº 1, pp. 249-256, 2015.
- SCHEURICH, F.; BROWN, R. E. “Modelling the aerodynamics of vertical-axis wind turbines in unsteady wind conditions”. Wind Energy, 16, 91-107, 2013.
- SHAMSHIRBAND, S.; PETKOVIC, D.; SABOOHI, H.; ANUAR, N. B.; INAYAT, I.; AKIB, S.; COJBASIC, Z.; NIKOLIC, V.; KIAH, M. L. M.; GANI, A. “Wind turbine power coefficient estimation by soft computing methodologies: Comparative study”. Energy Conversion and Management, 81, 520-526, 2014.
- SHARMA, R.; PATEL, B. “Design and simulation of Darrieus (Eggbeater) type vertical axis wind turbine using open source software Q blade”. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 1, 12, 2015.
- TESCH, K.; KLUDZINSKA, K.; DOERFFER, P. “Investigation of aerodynamics of an innovative vertical-axis wind turbine”. Science & Business Media Dordrecht, 2015.
- WENDT, J. F. “Computational fluid dynamics: An introduction”. Third edition. Springer, 2009.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

BASIC PRINCIPLES OF AERODYNAMICS OF THE OPERATION OF A DARRIEUS TURBINE

Alane Farias dos Santos, alanefarias9@gmail.com¹
Marcus Vinícius Sousa Rodrigues, marcus@ufersa.edu.br¹
Leonardo Magalhães Xavier Silva, leonardomxs@ufersa.edu.br¹

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Rua: Gamaliel Martins Bezerra, Nº 578. Bairro: Alto da Alegria, Angicos/RN. 59515-000.

Abstract: Wind power is the energy from the air circulation in the atmosphere caused by unequal heating of the Earth, corresponds to a type of clean and renewable energy that can easily be produced everywhere. The conversion of kinetic energy of the wind into electricity is made using wind turbines. These turbines are classified into two types: horizontal axis wind turbine (HAWTs), featuring horizontal axis rotor and have great efficiency and performance, so are used for large-scale energy production, and vertical axis wind turbine (VAWTs), with vertical axis rotor. Currently, vertical axis wind turbines have aroused the interest of manufacturers for its application in the generation of electricity on a small scale. The main vertical machine is the Darrieus rotor, which presents a structure of blades (usually two or three) with catenary shaped buckle. The main purpose of this article is to describe the basic principles of aerodynamics of the operation of a Darrieus turbine, featuring the mais advantages and disadvantages of the use of this device for converting wind energy into electrical energy.

Keywords: Aerodynamics, Wind systems, Darrieus rotor, Wind power.