

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DAS PÁS NA POTÊNCIA E EFICIÊNCIA MECÂNICAS DE UMA TURBINA EÓLICA HÍBRIDA DE EIXO VERTICAL DO TIPO SAVONIUS-DARRIEUS¹

CÉSAR ANTÓNIO MUBANGO HOGUANE²

¹Publicado no Ano de 2019;

²Universidade Eduardo Mondlane, Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Av. 1 de Julho, Aeroporto Expansão, Chuabo Dembe, Tel.: 823056104, C.P. 128 – Quelimane, www.marine.uem.mz.

Resumo

Turbinas eólicas do tipo Savonius operam a baixas velocidades de vento, mas tem baixa velocidade de rotação o que faz com que não sejam adequadas para a geração de altas quantidades de energia elétrica. As turbinas eólicas do tipo Darrieus, diferentemente, são mais adequadas para a geração de energia elétrica mas necessitam de altas velocidades de vento para que possam operar. Necessitam-se de turbinas híbridas para combinar as vantagens das duas. O presente estudo, dedicou-se a avaliação da influência do ângulo das pás da turbina em relação ao braço na velocidade necessária para iniciar o movimento da turbina, potência e eficiência mecânica de uma turbina eólica de eixo vertical tipo Savonius-Darrieus de três pás e testados nos seguintes ângulo das pás: 45, 54, 63, 72, 81 e 90°. As experiências consistiram na medição da velocidade do vento que incidiu no sistema utilizando um anemómetro e no registro do número de rotações da turbina utilizando uma camera digital. Deste estudo, concluiu-se que ângulos

menores podem desenvolver maior eficiência a baixas velocidades de vento, mas geram baixas potências mecânicas; enquanto ângulos maiores necessitam de velocidades de ventos mais altas para desenvolverem altas eficiências e potências mecânicas. A faixa ótima para o funcionamento deste sistema está entre 63 e 72°, uma vez que estes ângulos possuem uma combinação ideal entre a intensidade mínima de vento necessária para iniciar a turbina, a potência e eficiência mecânica.

Palavras-chaves: Ângulo das pás, Potência mecânica, Eficiência mecânica.

Abstract

Savonius type wind turbine can operate at lower wind pattern, but they have low rotating speed so they are not well suited to generate of large amounts of electrical power. Differently, Darrieus type vertical axis wind turbine are much suited for electrical power generation, but they require high wind speed patterns to operate. Hybrid turbine designs are required to combine the advantages of each system. In this study we address the influence of the Pitch Angle in the cut-in speed, mechanical power and efficiency of a three bladed Savonius-Darrieus vertical axis small prototype and tested the following pitch angles: 45, 54, 63, 72, 81 and 90°. The experiments consisted in measuring the wind velocity using a cap anemometer and registering the number of rotations of the turbine using a digital camera. From this study, was concluded that lower angles can develop higher efficiencies in lower wind speed pattern, but generate lower power; whereas larger angles require higher wind speeds pattern to develop higher Mechanical efficiencies. The optimum band to operate this system is between 63 to 72°, as these angles provide the ideal combination among the cut-in speed, the mechanical power and efficiency.

Key words: Pitch angle, Mechanical Power, Mechanical Efficiency.

NOMENCLATURA

A – Área de varredura;

E_t – Energia mecânica da turbina;

E_v – Energia cinética do vento;

I – Momento de inércia;

P_t – Potência mecânica da turbina;

P_v – Potência do vento;

r – raio;

v – Velocidade do vento;

Δt – Intervalo de tempo;

ε – Eficiência mecânica;

ρ – Densidade;

ω – Velocidade angular.

1. Introdução

Turbinas eólicas de eixo vertical do Tipo Savonius funcionam sobre força de arrasto, produzem um alto torque inicial. Tem como vantagem capacidade de operar a baixas velocidades de vento, podendo por isso ser implantada em locais de baixo potencial eólico. Contudo, possuem baixas rotações por minuto, desenvolvendo conseqüentemente baixa potência mecânica, o que constitui uma desvantagem para efeitos geração de energia elétrica. As Turbinas de eixo vertical do tipo Darrieus, pelo contrário, funcionam sobre forças de sustentação e tem baixo torque inicial. Tem a vantagem de girar a altas rotações por minutos, o que lhes proporciona maior potência mecânica e sendo por isso mais adequadas para geração de energia elétrica. Sua desvantagem é a necessidade de elevadas intensidades de vento para início de seu movimento, tendo por isso de ser implantada em locais de alto potencial eólico (Letcher, 2010; Alam e Iqbal, 2010).

As turbinas do tipo Savonius e as turbinas do tipo Darrieus representam dois extremos opostos. Por um lado as turbinas do tipo Savonius são eficientes a baixas velocidades de vento mas desenvolvem baixa potência mecânica; por outro lado as turbinas do tipo Darrieus necessitam de altas velocidades de vento para desenvolver maior eficiência e potência mecânicas. É da opinião de diversos autores que necessita-se de turbinas híbrida para combinar as vantagens das turbinas do tipo Darrieus e Savonius e ultrapassar as limitações de cada uma delas (Mahonar *et al*, 2007; Gupta *et al*, 2008; Alam e Iqbal, 2010; Letcher, 2010).

A velocidade de mínima para iniciar o movimento da turbina, a potência e a eficiência mecânicas são três parâmetros que determinam o funcionamento ótimo de uma turbina. A velocidade de início controla o regime dos ventos ao qual o sistema pode operar, e está intimamente relacionada com a eficiência, pois quanto maior a faixa de intensidade de vento que o sistema pode aproveitar, maior será a eficiência. A potência está relacionada com a quantidade de energia que a turbina pode gerar. E a eficiência está relacionada com a fração da energia bruta do vento que é aproveitada pela turbina.

Alam e Iqbal (2010) construíram uma turbina híbrida aquática do Tipo Savonius-Darrieus para a explorar o alto torque das turbinas do tipo Savonius, e a alta velocidade das turbinas do tipo Darrieus com vista a proporcionar uma baixa velocidade de início da turbina e uma maior

eficiência mecânica. Similarmente Letcher (2010) concebeu uma turbina eólica híbrida do tipo Savonius-Darrieus, onde pode-se aproveitar o alto torque da turbina do tipo Savonius para o início do Movimento e as altas rotações da turbina do Tipo Darrieus para proporcionar maior potência a baixas velocidades de vento e aumentando a eficiência total do sistema. Sabe-se que o ângulo das pás exerce influência no torque inicial e na força de sustentação de uma turbina do tipo Darrieus (Kirke e Lazauscas, 2008; Alam e Iqbal, 2010; Letcher, 2010). Daí que a variação do ângulo das pás afetar a potência e a eficiência deste dispositivo.

Nos estudos de Alam e Iqbal (2010) e Letcher (2010), o sistema híbrido é constituído por duas turbinas singulares, uma do tipo Savonius e outra do Tipo Darrieus com dimensões diferentes e conectadas ao mesmo eixo. Neste estudo, porém apresenta-se um desenho Híbrido Savonius-Darrieus diferente, denominada *Lenz 2*, constituído por três pás com formato aerodinâmico cortadas em um dos lados. O formato aerodinâmico das pás proporciona maior sustentação – característico das turbinas do Tipo Darrieus – e a concavidade, proporciona maior arrasto – característica das turbinas do tipo Savonius. Partindo do pressuposto que o ângulo das pás exerce influência no torque e na força de sustentação desenvolvida por turbinas do tipo Darrieus, este estudo, teve como objetivo analisar a influência do ângulo das pás no estabelecimento de um equilíbrio entre a velocidade de mínima de vento para iniciar o sistema, a potência e a eficiência mecânicas da turbina híbrida e determinar a faixa ótima dos ângulos para o funcionamento deste tipo de sistema.

Nas seções que se seguem apresenta-se o desenho da turbina, os materiais utilizados para a construção, os métodos para a realização das experiências e aquisição de dados, seguida da apresentação dos resultados e discussão dos mesmos e por fim a uma breve conclusão.

2. Materiais e métodos

2.1. Material

Para realização do presente estudo, foi construído um protótipo do tipo Savonius-Darrieus de três pás aerodinâmicas com uma razão do aspeto de 0.48, 6.0 kg de massa total, distando-se 120° uma da outra, com 0.50 m de altura das pás e 0.32 m de braço (raio), ilustrado na Figura 1. As tabelas

1 e 2 apresentam o material usado para construção do protótipo e para a realização da experiência, respectivamente.



Figura 1: Protótipo de Turbina em estudo.

Tabela 1: Material usado para a construção da Turbina.

Material	Utilidade
Cantoneiras (2x20mm)	Construção dos braços
Chapas de Zinco	Construção das pás
Tubo galvanizado	Eixo da turbina
Duas chumaceiras (P206)	Facilitar o movimento de rotação
Parafusos, porcas, estacas e barrotes	Construção da torre
Tinta Primária(zircão)	Evitar a corrosão

Tabela 2: Material usado para a experiência

Material	Utilidade
Máquina digital <i>SAMSUNG ES90</i>	Registo das rotações da turbina
Telefone <i>Nokia E71</i>	Filmagem do anemómetro
Anemómetro	Medição da velocidade do vento
Transferidor	Ajuste do ângulo das pás

2.2. Métodos

A experiência foi realizada ao ar livre no centro de pescas de Marrubune, na província da Zambézia e consistiu na medição da velocidade de vento que incidiu no sistema em cada um dos ângulos das pás: 45, 54, 63, 72, 81 e 90°; e no registo das rotações da turbina correspondentes durante um período de uma hora para cada ângulo. A Figura 2 apresenta o método usado para o ajuste do ângulo das pás.

A escolha destes ângulos reside no facto de que ângulos maiores em relação ao braço (segundo octante do primeiro quadrante) proporcionam maior potência, de acordo com estudos de Kirke e Lazauscas (2008) e os fundamentos da aerodinâmica (Hughes e Brington, 1967).

A medição da velocidade do vento foi feita numa frequência de 5 segundos durante o período de uma hora, para o efeito foi usado anemómetro manual de copos. O registo das velocidades do vento foi feito com auxílio de uma máquina digital de um telefone Nokia E71, pelo facto de se pretender executar uma medição em curtos intervalos de tempo. Os vídeos foram de seguida reproduzidos para contagem das rotações e registadas no Microsoft Excel onde foram calculadas médias móveis em cada 2 minutos. O anemómetro encontrava-se a uma altura de 2.83 metros e a base da turbina a uma altura de 2.20 metros do solo.

Nota: Neste trabalho considerou-se o braço da turbina como referencial para a medição do ângulo, enquanto na maior parte da literatura geralmente considera-se a órbita de rotação como referencial de contagem. Assim, o ângulo de 90° em relação ao braço neste trabalho, é

equivalente ao ângulo de 0° na literatura; e o ângulo de 81° neste trabalho, seria equivalente ao ângulo de 9° na literatura. Esta convecção foi adotada pelo autor devido a facilidade de medição do ângulo das pás tomando como referencial o braço da turbina (Figura 2).



Figura 2: Apresenta o método utilizado para o ajuste do ângulo das pás.

Para o registo do número de rotações da turbina foi utilizada uma máquina digital *SAMSUNG ES90* e os vídeos foram reproduzidos e as rotações foram contadas em cada 2 minutos e calculadas as médias.

2.3. Parâmetros e equações determinadas

- *Energia e Potência do vento*

A Energia " E_v " e a potência do vento " P_v " que incidem no sistema foi determinada a partir das expressões [1] e [2]:

$$E_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \Delta t \text{ [1]}; \quad P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \text{ [2]}$$

Onde: E_v – Energia do vento;

P_v – Potência do vento;

ρ – Densidade;

A – Área de varredura;

v – Velocidade do vento;

Δt – Intervalo de tempo em que o vento actuou.

- *Energia Cinética da Turbina*

A turbina é um corpo rígido que descreve um movimento circular, no presente trabalho, a energia cinética " E_t " e a potência mecânica " P_t " da turbina foram calculadas pelas seguintes expressões:

$$E_t = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad [2]$$

$$P_t = \frac{E_t}{\Delta t} \quad [3]$$

Onde: I – Momento de inércia;

w – Velocidade angular.

- *Eficiência*

A eficiência mecânica da turbina, é a fração da potência do vento que incide no sistema que a turbina consegue captar e transformar em Potência mecânica útil. Neste trabalho foi calculada pela razão entre a potência mecânica da turbina e potência do vento que incide no sistema, conforme ilustrado na Equação [4]:

$$\varepsilon = \frac{P_t}{P_v} \quad [4]$$

3. Resultados e Discussões

Intensidade mínima do vento necessária para iniciar o movimento da turbina

A potência média máxima do vento que incidiu no sistema durante o período de medição foi de 108.30 Watts, correspondente a intensidade média de vento de 8.70 ms^{-1} . A Figura 3 apresenta a intensidade de vento necessária para iniciar o movimento da turbina em função do ângulo das pás. Conforme se pode observar, a intensidade do vento necessária para iniciar o movimento da turbina aumenta linearmente com o ângulo das pás. A intensidade mínima necessária para iniciar

o sistema variou de 2.0 a 4.50 ms^{-1} , para os ângulos de 45 e 90° respectivamente. Este resultado provavelmente deve-se ao facto de o ângulo das pás exercer influência nas força de arrasto e de sustentação. Quanto menor for o ângulo das pás, maior será a força de arrasto e menor será a velocidade de vento necessária para iniciar o movimento do sistema; e por outro lado, quanto menor for o ângulo das pás, maior é a área de arrasto, o que significa maior torque inicial. Este fator vai de acordo com as observações de Kirke e Lazauscas (2008) e está em conformidade com as leis da aerodinâmica (Hughes e Brington, 1967).

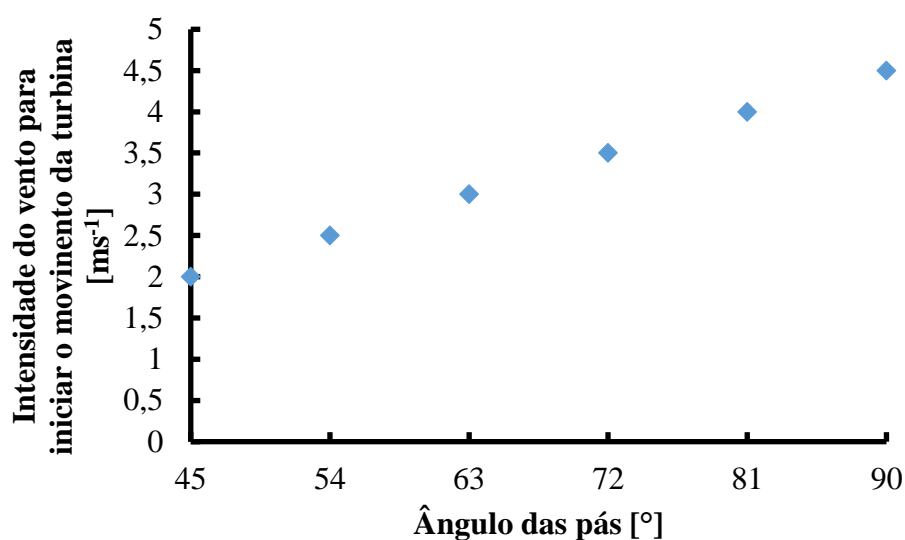


Figura 3: Intensidade mínima do vento necessária para iniciar o movimento da turbina em função do ângulo das pás. A Intensidade mínima para iniciar o movimento da turbina aumenta proporcionalmente com o ângulo das pás, sendo que maiores ângulos necessitam de maior intensidade de vento para iniciar o movimento da turbina.

Potência Mecânica da Turbina em função da velocidade do vento e do ângulo das pás

A Figura 4 apresenta a potência mecânica da turbina em função da intensidade do vento para os diferentes ângulos das pás. É notável uma tendência crescente do valor da potência mecânica dos 45 aos 63° – onde atinge o pico máximo – e de seguida decresce até o ângulo de 90° onde atinge o pico mínimo. O valor máximo de potência observado no ângulo de 90° foi de 5.20 Watts a uma intensidade média de vento de 5.80 ms^{-1} . No entanto, o ângulo de 63°, apresentou um valor de potência mínima de 17.00 Watts, a uma intensidade de vento de 5.80 ms^{-1} ; e a máxima foi de

cerca de 50.90 Watts, a uma intensidade média de vento de 8.20 ms^{-1} . Isto deve-se provavelmente ao facto de nestes ângulos a força de sustentação ser elevada, proporcionando maior rotação, e consequentemente maior potência mecânica. Esta tendência da variação da potência mecânica com o ângulo das pás está em conformidade com os fundamentos da mecânica aerodinâmica (Hughes e Brighton, 1967) é característico das turbinas do tipo Darrieus, conforme referido por Kirke e Lazauscas (2008), Letcher (2010) e Alam e Iqbal (2010).

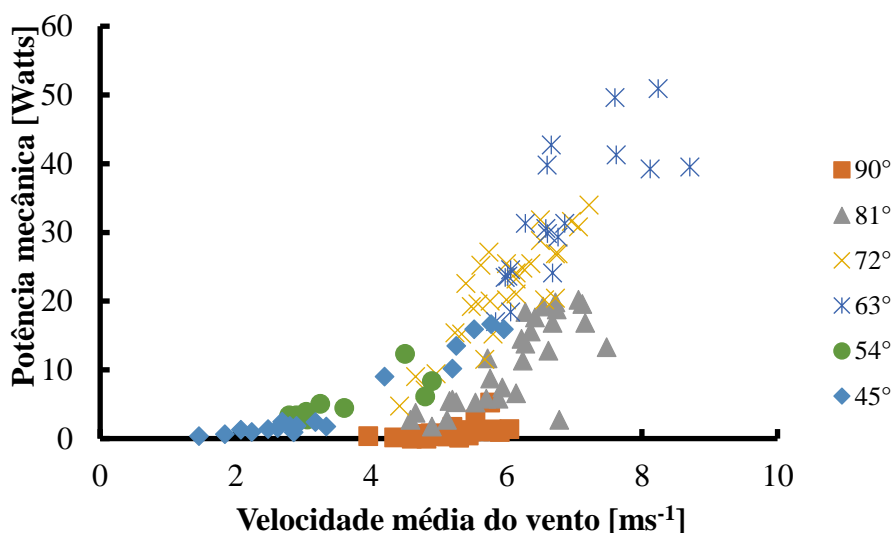


Figura 4: Potência mecânica da turbina em função da intensidade do vento para os diferentes ângulos pás. O ângulo de 90° apresenta o mínimo valor de potência, sendo que o máximo observado é de cerca de 5.20 Watts a uma velocidade de vento de 5.80 ms^{-1} ; enquanto o ângulo de 63° apresenta valores máximos de potência, tendo variado de 17.00 a 50.90 Watts para velocidades de vento correspondentes a velocidades de vento de cerca de 5.80 e 8.20 ms^{-1} , respetivamente.

Eficiência Mecânica da turbina em função da velocidade do vento e do ângulo das pás

A Figura 5 apresenta os valores de eficiência mecânica em função da intensidade do vento para os diferentes ângulos das pás. Onde se pode constatar que os ângulos menores (45° e 54°) apresentam altos valores de eficiência à intensidades de vento relativamente baixas que os ângulos maiores. O pico mínimo de eficiência observou-se no ângulo de 90° à intensidades de

vento que variam entre $4-6 \text{ ms}^{-1}$ e o pico máximo foi observado no ângulo de 54° à intensidades de vento menores que 4 ms^{-1} . Isto deve-se provavelmente ao facto de nos ângulos de 63 a 90° a turbina apresentar maior coeficiente de sustentação, e conseqüentemente maior número de rotações. Por outro lado, a elevada eficiência à intensidades de vento baixas nos ângulos 45 e 54° , sugere que a turbina se comportou como uma turbina do tipo Savonius, provavelmente devido a força de arrasto relativamente alta nestes ângulos. Enquanto os ângulos maiores 63 a 90° a turbina desenvolveu maior eficiência à intensidade de vento relativamente alta e tendo girado com altas rotações – o que é característico de turbinas do tipo Darrieus. Este fato deve-se provavelmente, à força de sustentação relativamente elevada e o torque inicial relativamente baixo nestes ângulos.

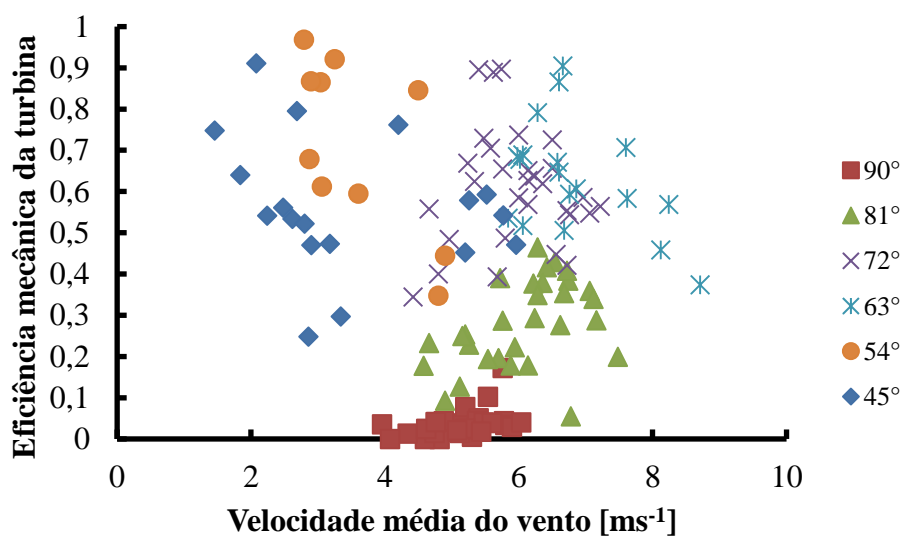


Figura 5: Eficiência mecânica em função da velocidade do vento e do ângulo das pás. Os ângulos menores (45 e 54°) desenvolvem altos valores de eficiência à baixas intensidades de vento em relação aos ângulos maiores. O pico mínimo de eficiência observa-se no ângulo de 90° a intensidades de vento que variam de $4-6 \text{ ms}^{-1}$. E o pico máximo observa-se no ângulo de 54° a intensidades de vento abaixo de 4 ms^{-1} .

Ângulo ótimo para o funcionamento da turbina híbrida

O principal objetivo deste estudo foi determinar o ângulo ótimo das pás para o funcionamento da turbina concebida, por via disto, estabeleceu-se três critérios para a seleção: i) faixa de equilíbrio entre a intensidade do vento necessária para iniciar a turbina e a potência mecânica adquirida

(Figura 6); ii) faixa de equilíbrio entre a eficiência mecânica e a intensidade do vento necessária para iniciar o sistema (Figura 7); iii) faixa de equilíbrio entre a potência e a eficiência mecânica (Figura 8). Os resultados que se seguem são referentes aos critérios adotados neste trabalho para a determinação do ângulo das pás ótimo para o funcionamento da turbina.

A Figura 6 apresenta três regiões “A”, “B” e “C”. Na região “A” – constituída por ângulos maiores que 45° e menores que 63° – a turbina inicia seu movimento com baixas intensidades de vento mas produz baixa potência mecânica; na região “C” – constituída por ângulos maiores entre 72° e pouco menores que 90° – a turbina necessita de velocidades de vento altas para iniciar o movimento e produz baixas potências mecânicas; a faixa “B” – constituída por ângulos entre 63° e pouco menores que 72° – encontra-se no centro, é uma região marcada pelo máximo valor de potência, e para o início do movimento não requer velocidades de vento tão altas quanto a faixa “C”, nem tão baixas quanto a faixa “A”.

O ângulo ou faixa ótima de ângulos para o funcionamento desses dispositivos vai depender do objetivo (geração de altas quantidades de energia ou não) e o local a ser implantado (alto ou baixo potencial eólico). Neste estudo, define-se como ângulo/faixa ótima de ângulos para o funcionamento da turbina, o ângulo/faixa de ângulos que ocorre a interseção dos seguintes aspectos: 1) a velocidade de início da turbina, 2) potência mecânica e 3) Eficiência mecânica. Fazendo-se uma intersecção entre os três critérios pode-se verificar que os ângulos por volta dos 63° satisfazem cada um dos critérios, sendo por isto considerados como a faixa ótima para o funcionamento do sistema híbrido concebido.

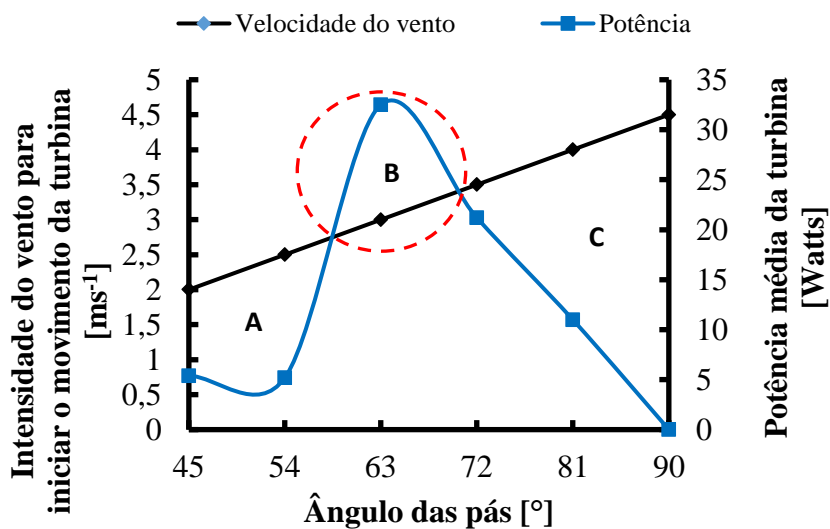


Figura 6: Potência mecânica média versus intensidade de vento necessária para iniciar a turbina em função do ângulo das pás. A faixa “B” é marcada pelos máximos de potência e a intensidade do vento para iniciar o movimento da turbina não é baixa quanto a faixa “A”, nem tão alta quanto a faixa “C”.

A Figura 7 apresenta a relação entre a eficiência mecânica e a intensidade do vento necessária para iniciar o sistema. Onde pode-se notar a existência de duas faixas distintas, nomeadamente, Faixa “A” – com ângulos entre 45 e 72° – e Faixa “B” – com ângulos entre 72 a 90°. A Faixa “A” é caracterizada por altos valores de eficiência e baixas intensidades do vento para iniciar o sistema. Sendo por isso mais vantajosa que a faixa “B”, que é caracterizada por baixos valores de eficiência e altos valores de intensidade do vento para iniciar a turbina.

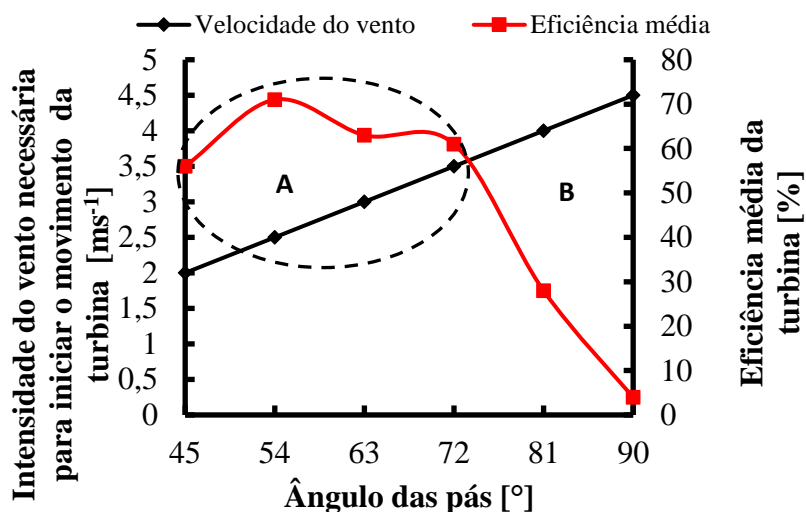


Figura 7: Intensidade de vento vs Eficiência mecânica média em função do ângulo das pás. Onde nota-se que a Faixa “A” apresenta vantagens sobre a Faixa “B” por combinar altos valores de eficiência com baixos valores de intensidade de vento para iniciar o sistema.

A Figura 8 apresenta a combinação entre as curvas da potência e eficiência mecânica da turbina onde pode-se distinguir três Faixas: a Faixa “A” – entre 45° até pouco menos de 63° – caracterizada por altos valores de eficiência e baixos valores de potência; a Faixa “B” – por volta dos 63° – caracterizada por valores médios de eficiência e o pico máximo de potência e a Faixa “C” – que se estende de aproximadamente 72-90° – caracterizada por baixos valores de eficiência e potência.

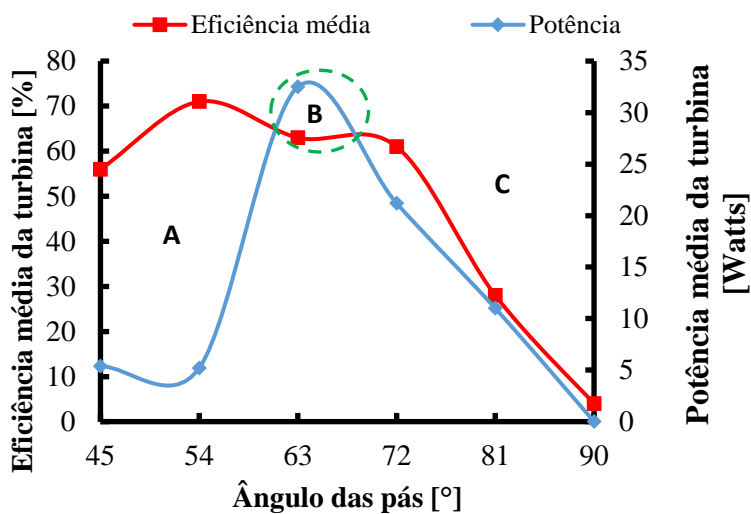


Figura 8: Eficiência vs Potência média em função do ângulo das pás. A faixa “B” possui uma boa combinação entre valores de eficiência e potência em relação as Faixas “A” e “C”. Embora a eficiência não seja tão alta quanto a Faixa “A”, a potência atinge seu pico máximo.

4. Conclusão

Deste estudo, pode-se verificar que o ângulo das pás controla a intensidade de vento para iniciar o sistema, tendo variado de 2 a 4.5 ms⁻¹, para os ângulos de 45 a 90° respectivamente. A potência média máxima foi de 32.50 Watts, observada no ângulo de 63°, e a mínima foi de 0.007 Watts, observada no ângulo de 90°. A eficiência média máxima adquirida foi de 71%, observada no ângulo de 54°, e a mínima de 4%, observada no ângulo de 90°. Pelo concluiu-se que ângulos menores – 45 e 54° – são eficientes a baixas velocidades de vento e desenvolvem baixas potências, portanto seu funcionamento assemelha-se às turbinas do tipo Savonius. Enquanto ângulos maiores – 63 a 90° são eficientes a altas velocidades de vento, desenvolvendo maiores potências e por isso se assemelham a turbinas do tipo Darrieus. A faixa ótima para o funcionamento deste tipo de sistema encontra-se entre 63 e 72°, por possuir uma combinação ideal entre a intensidade mínima de vento necessária para operar a turbina, a potência e eficiência mecânica, explorando vantagens dois tipos de turbinas.

5. Agradecimentos

Ao FNI (Fundo Nacional de Investimentos) pelo financiamento para a realização da pesquisa, à ESCMC (Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras) pela incentivo pela pesquisa e disposição na supervisão do estudo. E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso desta investigação.

6. Referências

- Alam, J. e Iqbal, T. **A low cut-in speed marine current turbine**. Journal of Ocean Technology. v. 5, n.4 p 49-61, 2010.
- Gupta R., Biswas, A., Sharma, K. K. **Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor**. Elsevier. v. 3, Issue 9 p 1974-1981, 2008.
- Hughes, W.F., & Brighton, J. A. **Theory and Problems of Fluid Dynamics**. Schaum Publishing Company, New York , 1967.
- Kirke, B. e Lazauskas, L. **Variable Pitch Darrieus Water Turbines**. Journal of fluid Science and technology, v. 3, n. 3, 2008. Disponível em: http://www.cyberiad.net/library/pdf/bkll_jfst_vol3_no3_2008.pdf. Acessado aos 5 de setembro de 2013
- Letcher, T. **Small scale wind turbines optimized for low wind speeds** 2010. Conference proceedings paper, Columbus. Disponível em: https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/45531/Hayes_Proceedings_Paper.pdf?sequence=1. Acessado aos 6 de outubro de 2013
- Manohar, K., Rampartap, A., and Ramkissoon, R. **Self starting Hybrid ‘H’ type wind turbine**. Conference proceedings, Energy Sustainability, Long Beach, California, 2007.