

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM ROTOR SAVONIUS COM ESTATOR

por

Franco Leonardo Ferreira Luz

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2013

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM ROTOR SAVONIUS COM ESTATOR

por

Franco Leonardo Ferreira Luz

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Sérgio Luiz Frey

Prof. Sérgio Viçosa Möller

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 14, novembro e 2013.

LUZ, F. L. F **ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM ROTOR SAVONIUS COM ESTATOR**. 2013. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

O presente relatório apresenta um estudo sobre formas de aumentar o desempenho de turbinas eólicas. Busca-se desenvolver conhecimentos na área de energia eólica e avaliar a influência do uso de um estator formado por quatro pás defletoras no desempenho de um rotor Savonius. É realizado um estudo experimental com um rotor Savonius em um túnel aerodinâmico, onde resultados de potência eletromecânica serão comparados no caso sem a utilização das pás defletoras e no caso com as pás defletoras. Com uma diferença de até 224% entre os valores de coeficiente de potência nos dois casos estudados, será mostrado que o rotor Savonius sem a utilização de pás defletoras tem maiores valores de coeficientes de potência se comparados com a mesma turbina Savonius operando com pás defletoras.

PALAVRAS-CHAVE: Turbina eólica, Savonius, experimental, defletor

LUZ, F. L. F **EXPERIMENTAL STUDY OF A SAVONIUS ROTOR WITH STATOR**. 2013. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

The present report presents a study about ways to increase the performance of wind turbines. Seeks to develop knowledge in the area of wind energy and to evaluate the influence of using a stator formed by four deflector blades in the performance of a Savonius rotor. An experimental study with a Savonius rotor will be held in an aerodynamic tunnel, wherein the results of electromechanical power will be compared in the case without the use of deflector blades and in the case with deflector blades. With a difference of up to 224% between the coefficients of power in the two cases studied, it will be shown that the Savonius rotor without the use of deflector blades have higher values of power coefficients compared to the same Savonius rotor operating with deflector blades.

KEYWORDS: Wind turbine, Savonius, experimental, deflector

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1. Desempenho de turbinas Savonius	2
3.2 Parâmetros de projeto.....	4
3.2.1 Placas de extremidade	4
3.2.2 Razão de aspecto.....	4
3.2.3 Afastamento e sobreposição	5
3.2.4 Número de pás e de estágios.....	5
3.2.5 Formato das pás.....	5
3.2.6 Interferência do eixo	5
3.2.7 Estatores	5
3.3 Máquinas elétricas	6
4. METODOLOGIA.....	6
4.1 Efeito de bloqueio	7
4.2 Fabricação do modelo.....	8
4.2.1 Seleção de materiais	8
4.2.2 Dimensionamento.....	8
4.3 Instrumentação	9
4.4 Procedimentos do experimento	10
4.5 Caracterização do escoamento	12
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
6. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE A.....	16
APÊNDICE B.....	18
ANEXO A.....	20

1. INTRODUÇÃO

O homem está cada vez mais preocupado em se desenvolver sustentavelmente e com isso a energia eólica vem ganhando espaço quando o assunto é geração de energia. Responsáveis pelo funcionamento de geradores de energia que operam a partir dos ventos, as turbinas eólicas podem ser construídas com um eixo vertical ou com um eixo horizontal. Entre as turbinas fabricadas com eixo vertical a do tipo Savonius se destaca pela facilidade de construção se comparadas com as demais [Custódio, 2009]. No entanto, sua utilização para geração de energia elétrica é restrita, pois opera com baixa velocidade, alto torque e baixo desempenho se comparado com turbinas eólicas de eixo horizontal, sendo recomendada para o bombeamento de água e moagem de grãos [Custódio, 2009]. Dessa forma, estudos são realizados com o intuito de aumentar o desempenho de turbinas eólicas do tipo Savonius e assim, difundir uma conscientização ambiental entre as pessoas disponibilizando geradores eólicos de custos acessíveis e com desempenhos satisfatórios.

Geradores eólicos são responsáveis por converter a energia cinética do vento em energia elétrica e compreendem uma turbina eólica, responsável por converter a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação de um eixo [Carvalho, 2003]. Esse eixo é acoplado a um gerador elétrico, responsável por converter sua energia mecânica de rotação em energia elétrica [Carvalho, 2003]. Existem turbinas eólicas que trabalham com o princípio de arrasto e outras que operam com o princípio de sustentação. A força de arrasto atuante sobre as pás conectadas ao eixo da turbina dá origem a um torque aerodinâmico em um eixo, sendo dito eixo acoplado ao gerador elétrico [Akwa, 2010].

Uma turbina eólica tipo Savonius compreende uma pá com lado côncavo, denominada pá de avanço, e uma pá com lado convexo, denominada pá de retorno [Akwa, 2010]. Essas turbinas operam predominantemente com forças de arrasto, no entanto, forças de sustentação também são responsáveis pela potência apresentada no eixo [Akwa, 2010]. Durante a operação, a pá de avanço apresenta uma força resultante maior que aquela apresentada pela pá de retorno, resultando em uma diferença de forças responsável por um torque resultante no eixo da turbina [Akwa, 2010].

Uma das vantagens na utilização de turbinas eólicas de eixo vertical é a possibilidade de operar sem sistemas de direcionamentos de vento, pois sua configuração construtiva permite operar em qualquer direção de incidência do vento [Akwa, 2010]. No entanto, parte da potência que poderia ser aproveitada na área ocupada pela pá de retorno é perdida, atribuindo desempenhos de geração de energia menores para turbinas de eixo vertical se comparados com turbinas de eixo horizontal [Akwa, 2010]. Porém a facilidade de fabricação e o baixo custo de turbinas eólicas do tipo Savonius as tornam opções viáveis frente às turbinas de outros tipos [Akwa, 2010]. Estudos foram realizados a fim de se analisar a influência de um estator para bloquear a passagem do ar que incidiria nas pás de retorno e assim, aumentar a potência gerada pela turbina eólica.

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo analisar experimentalmente a influência da utilização de estatores compreendidos por quatro pás defletoras no desempenho de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius. As pás defletoras tem a função de reduzir a ação do escoamento de ar sobre as pás de retorno.

Assim, busca-se desenvolver conhecimentos de metodologias para experimentos de turbinas eólicas em um túnel aerodinâmico, onde almeja-se o levantamento de dados que possibilitem a comparação da potência gerada pela turbina eólica em questão em uma situação sem as pás defletoras e, posteriormente, com a utilização das pás defletoras. A partir de estudos numéricos realizados por Akwa, 2010, é possível comparar os resultados obtidos em seu estudo, com os resultados experimentais do presente estudo.

Além disso, busca-se uma análise do custo agregado à turbina eólica com a utilização das pás defletoras com o benefício alcançado na eficiência de geração de energia elétrica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Desempenho de turbinas Savonius

De acordo com Custódio, 2009, a potência do vento que pode ser extraída por uma turbina eólica é definida pela equação 3.1:

$$P_t = P_e - P_s \quad (3.1)$$

onde P_t é a potência total extraída do vento pela turbina eólica, P_e é a potência disponível no vento na entrada da turbina eólica e P_s é a potência disponível no vento após a passagem pela turbina eólica.

Ainda de acordo com Custódio, 2009, P_e pode ser obtido por intermédio da equação 3.2:

$$P_e = \frac{1}{2} \dot{m} v_e^2 \quad (3.2)$$

Sendo que \dot{m} pode ser definido na equação 3.3:

$$\dot{m} = \rho A v_e \quad (3.3)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica de ar, v_e é a velocidade do vento na entrada da turbina eólica, ρ é a massa específica do ar e A é a área da seção transversal da turbina eólica.

A partir das equações 3.1 e 3.3 pode-se verificar que a potência disponível no escoamento após a turbina não pode ser nula, pois isto implica em uma vazão mássica nula através da turbina, portanto, a máxima potência extraída do vento por uma turbina eólica não é 100% da potencia de entrada. Como demonstra Betz, o valor máximo possível da potencia total extraída por uma turbina eólica é de 16/27 de P_e , o que representa cerca de 59,3% [Custódio, 2009]. De acordo com Custódio, 2009, esse valor é chamado de Coeficiente de Betz C_{Betz} . Custódio, 2009, ainda define um coeficiente de potência C_p como sendo a relação entre a potência total extraída do vento pela turbina eólica e a potência disponível no vento na entrada da turbina eólica, chegando-se à equação 3.4.

$$C_p = \frac{P_t}{P_e} \quad (3.4)$$

Por se tratar de um valor adimensional, o coeficiente de potência C_p é utilizado na literatura para comparar resultados obtidos por diferentes turbinas eólicas estudadas. Carvalho, 2003, define o coeficiente de potência como sendo “a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor”, onde o rotor citado por Carvalho, 2003, equivale a uma turbina eólica. Além disso, Carvalho, 2003, ainda define uma velocidade específica λ , ou razão de velocidade de ponta, de acordo com a equação 3.5. A razão de velocidade de ponta é um valor adimensional que estabelece uma relação entre a velocidade de rotação na ponta das pás da turbina eólica v_u e a velocidade do vento na entrada da turbina eólica v_e . Esse valor também é utilizado para comparar os resultados de diferentes turbinas eólicas.

$$\lambda = \frac{v_u}{v_e} \quad (3.5)$$

Sendo que a velocidade v_u pode ser definida conforme a equação 3.6:

$$v_u = \omega r \quad (3.6)$$

onde ω é a velocidade angular da turbina eólica e r é o raio da turbina eólica.

De acordo com Akwa, 2010, “curvas adimensionais podem ser utilizadas em comparações com outros tipos de mecanismos eólicos”. Hayashi et al., 2005, utiliza gráficos de C_p em função de λ para comparar resultados de diferentes estudos sobre turbinas eólicas.

Akwa, 2010, comprova a importância do número de Reynolds, definido de acordo com a equação 3.7, no desempenho das turbinas Savonius, sendo este, portanto, outro parâmetro adimensional a ser considerado na comparação entre diferentes turbinas.

$$R_e = \frac{\rho v_e d_r}{\mu} \quad (3.7)$$

onde μ é a viscosidade do ar e d_r é o diâmetro do rotor eólico.

O presente estudo experimental faz uso do Túnel Aerodinâmico Debi Pada Sadhu, do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS. Dessa forma, o fluido utilizado nos testes é o ar. A partir da equação de estado de um gás ideal, equação 3.8, é possível determinar a massa específica do a partir do conhecimento da temperatura “T” e da pressão “p” do ar no escoamento.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3.8)$$

onde R é a constante do gás, para o ar é de $287,0530 \frac{J}{kgK}$.

Fox et al., 2010, definem a viscosidade conforme apresentando na equação 3.9:

$$\mu = \frac{bT^{0,5}}{1 + S/T} \quad (3.9)$$

sendo que:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \quad (3.9a)$$

$$S = 110,4 \quad (3.9b)$$

3.2 Parâmetros de projeto

Akwa, 2010, fez um estudo numérico onde analisou a influência da utilização de diferentes configurações de estatores em uma turbina eólica tipo Savonius. Para o estudo numérico realizado por Akwa, 2010, uma turbina eólica tipo Savonius foi projetada segundo parâmetros estabelecidos na literatura para alcançar valores de C_p satisfatórios para sua utilização em geradores eólicos.

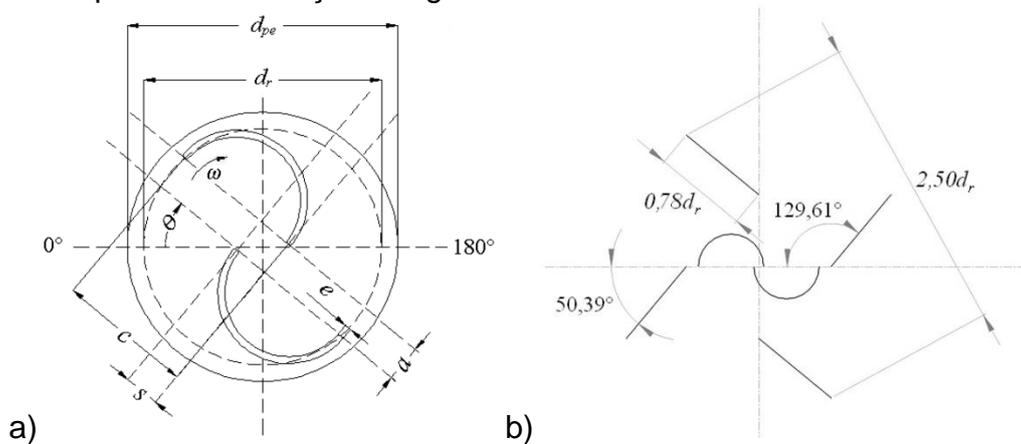


Figura 3.1 – a) Representação da seção transversal de um rotor Savonius. (adaptado de Akwa, 2010); b) Parâmetros para um estator formado por quatro pás defletoras. (adaptado de Akwa, 2010)

3.2.1 Placas de extremidade

De acordo com Ushiyama, 1988, a utilização de placas de extremidade é capaz de aumentar o coeficiente de potência de uma turbina eólica. Placas de extremidade são compreendidas por discos dispostos acima e abaixo das pás de uma turbina Savonius. Akwa, 2010, esclarece que há um consenso na dimensão recomendada para o diâmetro das placas de extremidade (d_{pe}) como sendo 1,1 vez o diâmetro do rotor (d_r) com “uma espessura desprezível à altura do rotor”.

3.2.2 Razão de aspecto

A razão de aspecto (R_a) é a relação da altura do rotor (H_r) com o seu diâmetro (d_r) definida na equação 3.10, onde H_r é a altura do rotor.

$$R_a = \frac{H_r}{d_r} \quad (3.10)$$

Akwa, 2010, esclarece que estudos realizados na área comprovam que uma razão de aspecto de cerca de 2 já proporciona resultados satisfatórios no desempenho de turbinas eólicas tipo Savonius.

3.2.3 Afastamento e sobreposição

Fujisawa, 1991, realizou estudos experimentais em turbinas Savonius com diferentes configurações no posicionamento das suas pás, variando o afastamento “a” e a sobreposição “s”, figura 3.1a, e definindo uma razão de sobreposição como sendo a razão entre “s” e o diâmetro do arco das pás do rotor “c”.

Chegou-se a conclusão de que o desempenho da turbina Savonius estudada obteve ganhos satisfatórios de desempenho com a presença de uma sobreposição nas pás seguindo uma razão de sobreposição de 0,15 e um afastamento nulo.

3.2.4 Número de pás e de estágios

De acordo com Akwa, 2010, a adição de pás influi de forma negativa no desempenho de uma turbina eólica tipo Savonius. Akwa, 2010, esclarece que as pás acabam “defletindo o escoamento de ar que incidiria na pá posterior”, resultando em uma menor disponibilidade de potência a ser extraída pelo rotor. Assim, Akwa, 2010, conclui que “um rotor Savonius de duas pás possui um rendimento médio durante a operação superior aos rotores com maior número de pás”.

Turbinas Savonius podem ser construídas com a adição de um rotor em paralelo operando de forma defasada, acrescentando um estágio a mais ao rotor. Saha et al., 2008, realizou um estudo experimental com turbinas Savonius de um, dois e três estágios e ainda variando o número de pás nos experimentos, chegando a valores de coeficientes de potência superiores no caso da utilização de uma turbina com dois estágios e duas pás, e ainda com uma menor oscilação de torque se comparado com os outros casos estudados.

3.2.5 Formato das pás

Kamoji et al., 2008, realizou um estudo experimental onde avaliou o desempenho de uma turbina Savonius com pás em formato de gancho e em formato de “U”. Os resultados obtidos no estudo experimental de Kamoji et al., 2008, mostram valores para C_p 20% superiores para a configuração da turbina Savonius utilizando pás com formato de gancho em relação a configuração com pás em formato de “U”.

3.2.6 Interferência do eixo

De acordo com Akwa, 2010, estudos realizados com turbinas Savonius dotadas de um eixo passante revelam que o escoamento através da sobreposição das pás é influenciado. Apesar de um eixo passante propiciar um aumento na rigidez da estrutura de uma turbina Savonius, dito eixo proporciona uma redução na potência da turbina em uma dada velocidade de vento. Dessa forma, Kamoji et al., 2008, realizou estudos experimentais em uma turbina Savonius com e sem um eixo passante, conseguindo resultados cerca de 47% maiores para C_p na situação sem o eixo passante se comparado com a situação com eixo passante.

3.2.7 Estatores

Akwa, 2010, esclarece que estatores são utilizados na busca de um aumento na potência convertida por uma turbina eólica. A partir de estudos realizados por outros autores, Akwa, 2010, definiu parâmetros para o projeto de um estator utilizando quatro pás defletoras, onde atribuiu ao diâmetro do estator D_{est} uma relação de 2,5 vezes maior que o diâmetro do rotor d_r , um tamanho para as pás defletoras (L_{est}) 0,78 vezes o diâmetro do rotor d_r e um ângulo de montagem das pás defletoras de $129,61^\circ$, conforme pode ser visualizado na figura 3.1b.

3.3 Máquinas elétricas

Bim, 2009, esclarece que uma máquina elétrica opera em um modo motor quando uma potência eletromecânica P_{em} é imposta a ela, resultando na conversão de energia elétrica em energia mecânica de rotação do seu eixo. Quando uma máquina elétrica opera no modo gerador, uma potência mecânica é imposta ao seu eixo de forma a rotacioná-lo e, de acordo com a Lei de Faraday, convertendo energia mecânica de rotação em energia elétrica.

Ainda de acordo com Bim, 2009, quando uma máquina de corrente contínua opera no modo gerador, uma fração da potência mecânica disponibilizada pela turbina eólica no eixo do rotor é convertida em uma potência eletromecânica P_{em} . A potência P_{em} de uma máquina elétrica, operando no modo gerador “designa a fração da potência mecânica convertida em energia elétrica”, e é definida conforme a equação 3.11.

$$P_{em} = E_a I_a \quad (3.11)$$

Segundo a lei de Ohm, temos a equação 3.12:

$$E_a = R_a I_a \quad (3.12)$$

onde E_a é a tensão nos terminais da máquina elétrica, I_a é a corrente que circula do terminal positivo da tensão E_a para o terminal negativo e R_a é a resistência do circuito.

4. METODOLOGIA

Para o presente estudo experimental, construiu-se um modelo para testes em um túnel aerodinâmico segundo os parâmetros de projeto previamente abordados na seção 3.2.

Conforme discutido na seção 3.2.4 e 3.2.6, decidiu-se elaborar um modelo de turbina eólica com duas pás, com dois estágios e sem o eixo passante. Apesar de pás com formato em gancho apresentarem desempenho maiores se comparados com pás em formato de “U”, conforme discutido na seção 3.2.5, optou-se pela utilização de uma turbina Savonius com as pás em formato de “U”, pois são de mais fácil fabricação se comparadas com as pás em formato de gancho.

A figura 4.1a ilustra o modelo construído para o estudo em questão.

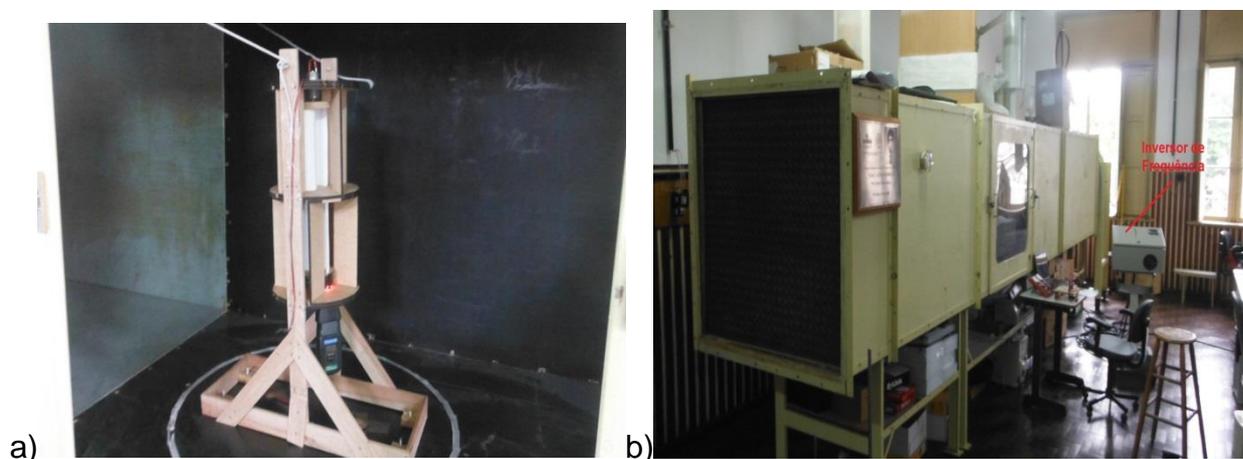


Figura 4.1 – a) Rotor de estudo; b) Túnel Aerodinâmico Debi Pada Sadhu

Pode-se perceber a utilização de uma estrutura de sustentação que permite posicionar a turbina Savonius, juntamente com o estator, no centro do túnel aerodinâmico. Posteriormente serão detalhadas as dimensões adotadas na fabricação da turbina e do estator. Para facilitar a troca entre as duas situações de estudo, com e sem as pás defletoras, optou-se por realizar um estator fixo com as pás removíveis.

A figura 4.1b ilustra o Túnel Aerodinâmico Debi Pada Sadhu utilizado no experimento. Ele se encontra no Laboratório de Mecânica de Fluidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e possui seção transversal de 1 x 1 m, com velocidade máxima de escoamento de ar no seu interior de cerca de 9 m/s. Nessa figura também é possível visualizar o inversor de frequência utilizado para variar a rotação do motor acoplado ao ventilador do túnel aerodinâmico e assim, variar a velocidade do escoamento no interior do mesmo.

Para a aquisição de dados no experimento, utilizou-se uma máquina de corrente contínua, como pode ser visualizado na porção superior do modelo apresentado na figura 4.1a, junto à turbina eólica operando no modo gerador. Dessa forma, quando a turbina eólica girar devido ao escoamento de ar no interior do túnel aerodinâmico, uma tensão é observada nos terminais da máquina elétrica. Assim, ao colocar resistores em série em um circuito junto à máquina elétrica, será possível variar a rotação da turbina eólica devido à adição de uma carga ao circuito. Com a adição de resistores em série, uma corrente atuará sobre o circuito, possibilitando a medição da potência gerada. Em uma primeira situação a potência é medida com a turbina operando sem o estator e posteriormente, em uma segunda situação, a potência será medida com a dita turbina eólica operando com o estator.

O mancal da porção superior do rotor é compreendido pela própria máquina elétrica e na sua porção inferior é um rolamento radial.

4.1 Efeito de bloqueio

O efeito de bloqueio é um parâmetro que deve ser observado nos estudos experimentais em túneis, na discussão dos dados obtidos para velocidades de vento na entrada da turbina. Caso o modelo que se deseja estudar em um experimento em um túnel aerodinâmico tenha uma área de seção transversal maior que a recomendada, o escoamento de ar nas laterais da turbina eólica passa a acelerar devido à diminuição da área entre o modelo que se deseja estudar e as paredes do túnel. Existem poucos estudos sobre como estimar o efeito de bloqueio devido à introdução de um corpo vazado no interior de um túnel aerodinâmico. Pope e Harper, 1966, recomendam a utilização de 7,5% da área da seção de testes de um túnel aerodinâmico. Caso não seja possível, deve-se utilizar a equação 3.9 para correção da velocidade do vento na entrada da turbina eólica:

$$v_e = v_{on} \left[1 + \left(\frac{1}{4} \frac{A_r}{A_T} \right) \right] \quad (4.1)$$

onde v_{on} é a velocidade média do vento na seção de testes de um túnel aerodinâmico, em m/s, A_r é a área projetada pela turbina eólica e A_T é a área da seção de testes.

4.2 Fabricação do modelo

4.2.1 Seleção de materiais

Para a fabricação da turbina Savonius do estudo em questão optou-se pela utilização de madeira MDF na fabricação dos discos. Essa opção foi feita, pois chapas de MDF podem ser facilmente encontradas a um custo acessível. Optou-se pela utilização de chapas de 6 mm de espessura, pois é a espessura máxima para utilização de processo de corte a laser e daria boa sustentação para as pás do rotor e do estator.

Para a confecção das pás do rotor, optou-se pela utilização de PVC na espessura de 1 mm, pois é um material acessível e possível de ser arqueado de acordo com o formato desejado.

4.2.2 Dimensionamento

Para iniciar o dimensionamento da turbina eólica tipo Savonius do presente estudo experimental, decidiu-se por utilizar uma área equivalente a 10% da área da seção de teste do túnel aerodinâmico. Apesar da recomendação de Pope e Harper, 1966, quanto a utilização de 7,5% da área da seção de testes, conforme discutido na seção 3.3, o uso de defletores fez com que a área ocupada pelo rotor eólica fosse diminuída, colocando em dúvida se as dimensões adotadas levariam o rotor a funcionar para o experimento.

Dessa forma, optou-se por uma área ocupada pelo conjunto estator-rotor de 10% do 1 m² de área da seção do túnel aerodinâmico, resultando numa área do estator (A_{est}) de 0,1 m². A área do estator pode ser calculada pela equação 4.1:

$$A_{est} = H_{est}D_{est} = 0,1 \text{ m}^2 \quad (4.1)$$

onde H_{est} é a altura do estator, e D_{est} é o diâmetro do estator.

De acordo com os parâmetros apresentados na seção 3.2.7, o diâmetro do estator deve ser no mínimo 2,5 vezes o tamanho do diâmetro do rotor. No entanto, como as pás do estator serão removíveis, foram adicionados 12 mm ao diâmetro do estator como folga. Sendo assim:

$$D'_{est} = 2,5d_r + 0,012 \quad (4.2)$$

Para a definição da altura do estator, procurou-se deixar 32.5 mm entre os discos de extremidade do rotor e os discos do estator para a montagem do eixo do rotor na porção inferior e da máquina elétrica de corrente contínua na porção superior do estator. Sendo assim:

$$H_{est} = H_r + 0,065 \quad (4.3)$$

Como a turbina estudada tem dois estágios, cada estágio deverá respeitar a razão de aspecto apresentada na equação 3.13 resultando em:

$$H_r = 4D_r \quad (4.4)$$

Substituindo 4.4 em 4.3, e 4.3, e 4.2 em 4.1, temos que:

$$d_r = 89,64 \text{ mm}$$

$$H_r = 358.56 \text{ mm}$$

Utilizando o parâmetro apresentado na seção 3.2.1 para o diâmetro das placas de extremidade, chegamos que:

$$D_{pe} = 98,6 \text{ mm}$$

Como pode ser visualizado na figura 3.1a, onde pode-se observar a disposição das pás do rotor e da sobreposição, chega-se a uma relação entre o diâmetro do arco das pás do rotor “c” e a sobreposição “s” conforme a equação 4.5:

$$d_r = 2c - s = 89,64 \text{ mm} \quad (4.5)$$

Conforme discutido na seção 3.2.3, há um desempenho satisfatório em uma turbina Savonius quando adotado uma razão de sobreposição de 0,15, conforme equação 4.6.

$$\frac{s}{c} = 0,15 \quad (4.6)$$

Substituindo a equação 4.6 em 4.5, chega-se que:

$$\begin{aligned} c &= 48,45 \text{ mm} \\ s &= 7,27 \text{ mm} \end{aligned}$$

Com os valores já calculados é possível chegar que:

$$\begin{aligned} H_{est} &= 423,56 \text{ mm} \\ D_{est} &= 236,1 \text{ mm} \\ L_{est} &= 69,92 \text{ mm} \end{aligned}$$

Após calcular todas as dimensões da turbina e do estator, desenhou-se o modelo a ser estudado no programa de computador *Solidworks*. Os desenhos foram utilizados para terceirizar o corte das peças a laser e para posteriormente auxiliar na montagem do modelo. Os discos do estator estão fixos na estrutura, apresentada na figura 4.1a, possibilitando que as pás defletoras possam ser retiradas e que os testes sejam realizados nas duas situações propostas.

4.3 Instrumentação

Para realizar a medição da potência em um circuito é necessário o conhecimento da tensão e da corrente que atua sobre ele. A fim de possibilitar a utilização de um multímetro, com incerteza de medição para tensão contínua de $\pm 0,05\%$, para a obtenção dos dados de tensão do circuito e outro multímetro, com incerteza de medição para corrente contínua de $\pm 0,1\%$, para a obtenção dos dados de corrente do circuito, fabricou-se uma base em MDF, figura 4.3a, onde se posicionou 4 terminais e uma *protoboard* para facilitar o uso de diferentes resistores em série junto a máquina elétrica montada na turbina. Os terminais e a *protoboard* da base em MDF foram montados segundo um circuito representando na figura 4.3b.

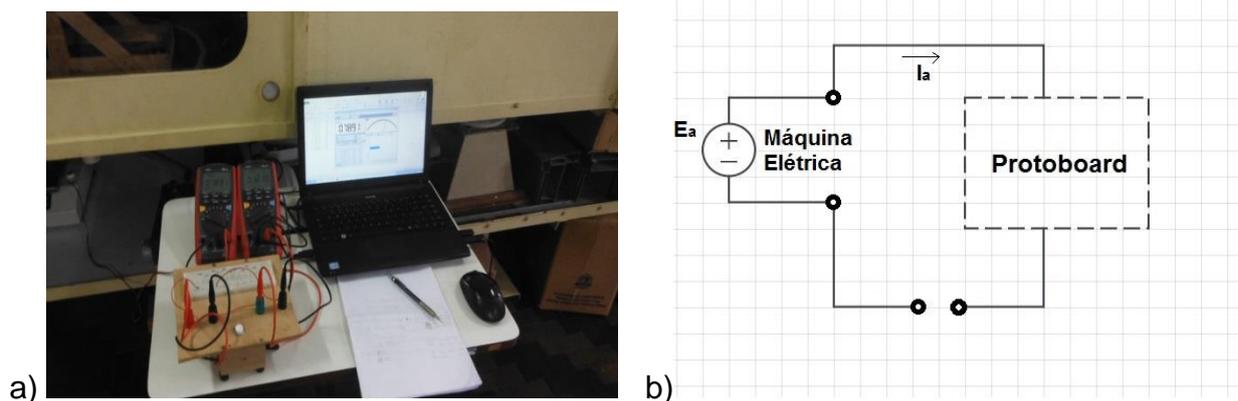


Figura 4.2 – a) Base de MDF; b) Representação do circuito da base de MDF.

Nas figuras 4.2a e 4.2b é possível visualizar que dois terminais foram montados em paralelo à máquina elétrica, para possibilitar a medição da tensão gerada por ela, e que outros dois terminais foram montados em série no circuito junto à *protoboard*, para possibilitar a medição da corrente atuante no circuito.

Para o cálculo da resistência a ser utilizada no experimento, primeiro precisa-se saber a potência estimada de geração da turbina utilizada nos testes. Para tanto, utilizou-se as equações 3.2, 3.3 e 3.4 substituindo os valores de 8 m/s para a velocidade do vento no interior do túnel aerodinâmico, $1,2 \text{ kg/m}^3$ para a massa específica do ar a 20°C , 0,0321 para a área a partir dos valores da altura e do diâmetro do rotor calculados anteriormente e um C_p de 0,2, valor de coeficiente de potência comumente encontrado na literatura para turbinas Savonius operando na potência máxima. Com essas informações, chega-se a um valor de $P_t = 1,97 \text{ W}$.

Após testes preliminares com a turbina eólica, onde ela foi submetida a diferentes velocidades de vento, levantaram-se dados a respeito da máquina elétrica de corrente contínua. Esses dados podem ser visualizados na tabela A.1 do Apêndice A. A partir dos dados levantados, observou-se uma tensão de operação na máxima velocidade de escoamento no interior do túnel aerodinâmico de aproximadamente 12 volts. Utilizando o valor de P_t estimado de 1,97 watts e a tensão encontrada de 12 volts nas equações 3,11 e 3.12, chega-se a uma resistência de $73,1 \Omega$ para se chegar a potência estimada. Para o presente estudo experimental, a potência total extraída do vento (P_t) é potência eletromecânica (P_{em}) atuante sobre o circuito utilizado nos testes. Dessa forma, o coeficiente de potência (C_p) apresentado na equação 3.4 será calculado com P_{em} no lugar de P_t .

No entanto, dentre os resistores disponíveis para o experimento apenas 5 resistores de $4,7 \Omega$ correspondiam as grandezas de resistência para os testes. Dessa forma, os testes foram realizados utilizando estes 5 resistores variando a quantidade deles colocados em série para se obter as diferentes rotações da turbina em cada caso.

Para a medição da rotação do rotor, um tacômetro a laser, com incerteza de medição de $\pm 0,05\%$, foi acoplado diretamente à turbina, como pode ser visualizado na figura 4.1.

4.4 Procedimentos do experimento

Para a realização do experimento, a turbina dimensionada e fabricada conforme abordada na seção 4.2.2 é montada no centro da seção transversal do túnel

aerodinâmico. Cordas foram utilizadas para evitar vibrações excessivas no modelo e que poderiam comprometer a estabilidade da turbina e a turbina foi aparafusada na base do túnel.

Com a turbina devidamente montada no túnel aerodinâmico, conectou-se a máquina elétrica nos terminais da base de MDF que estão em paralelo com o circuito. Após, deve-se conectar um multímetro nos terminais em paralelo no circuito e outro multímetro nos terminais em série no circuito. Os multímetros utilizados para o estudo em questão podem ser conectados junto a um computador para a aquisição de dados. Sendo assim, conectaram-se os dois multímetros em um notebook, figura 4.3a, para que fosse possível a aquisição dos dados de corrente e de tensão no circuito. Espera-se que os valores de tensão e de corrente no circuito tenham oscilação, por isso foram adquiridos mais de um valor em cada medição para que posteriormente fosse calculada uma média.

Nesse momento, fecha-se a janela de acesso ao modelo do túnel aerodinâmico e submete-se a turbina eólica do presente estudo a um escoamento de ar em no túnel aerodinâmico. Com o auxílio de um inversor de frequência, é possível variar a velocidade do vento no interior do túnel aerodinâmico.

O inversor de frequência em questão é capaz de variar a frequência do motor responsável pelo escoamento de ar no interior do túnel aerodinâmico, figura 4.8, de 0 hz até cerca de 44 hz, quando o motor atinge sua rotação máxima.

Nos testes preliminares com a turbina eólica, percebeu-se que ela começava a operar com o inversor ajustado para a frequência de 29,15 hz. Sendo assim, procurou-se adquirir dados para diferentes valores de frequência para que posteriormente com o auxílio de um tubo de Prandtl, fosse medida a velocidade do escoamento do ar nas frequências escolhidas para o estudo. Para a realização do experimento, foram adquiridos dados para as frequências de 29,15 hz, 31,5 hz, 38,6 hz e 43,4 hz nas duas situações propostas.

Dessa forma, ao colocar a turbina em operação em determinada frequência do inversor, variou-se os resistores na protoboard com valores de resistências de 23,5 Ω , 18,8 Ω , 14,1 Ω , 9,4 Ω , 4,7 Ω e 0 (zero) Ω . Durante a variação dos resistores, anotou-se o valor de rotação mínimo e máximo mostrado no tacômetro para as diferentes configurações de resistores em série para posteriormente calcular a média da velocidade angular. Ao final das medições, os dados de tensão e de corrente foram organizados nas tabelas A.2 e A.3 do Apêndice A, juntamente com os respectivos valores de potência calculados utilizando a equação 3.14. Os dados de velocidade angular obtido com o tacômetro utilizado no experimento eram fornecidos em rotações por minuto, sendo convertidos em rad/s nas tabelas A.2 e A.3.

Após a realização dos testes, retirou-se a turbina Savonius do presente estudo do interior do túnel aerodinâmico e utilizou-se um tubo de Pradtl para a medição da velocidade do escoamento de ar para os valores de frequência utilizados no experimento. A velocidade obtida com o tubo de Prandtl foi então corrigida com a utilização da equação 4.1, com os dados sendo organizados na tabela A.4 do Apêndice A.

Por fim, mediu-se a temperatura do ambiente e a pressão atmosférica com o auxílio de um termômetro e de um barômetro de Torriceli, respectivamente, disponíveis no laboratório onde os testes foram realizados. Para o presente estudo as medições foram feitas com temperatura do ambiente a 23°C e com pressão atmosférica de 753 mmHg.

Utilizando os valores de temperatura e de pressão observados no termômetro e no barômetro de Torricelli, pode-se calcular os valores da massa específica e da viscosidade do ar utilizando as equações 3.8 e 3.9 respectivamente, chegando a:

$$\begin{aligned}\rho &= 1,1934 \text{ kg/m}^3 \\ \mu &= 1,8137 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2\end{aligned}$$

Com a potência eletromecânica calculada a partir da corrente e da tensão obtidas com os multímetros, com os valores de ρ e de μ também calculados e com os valores da velocidade angular em rad/s, é possível calcular os valores de C_p e de λ para as velocidades de escoamento estudadas nas duas situações propostas, conforme pode ser visualizado nas tabelas A.2 e A.3 do Apêndice A.

4.5 Caracterização do escoamento

Para a caracterização do escoamento de ar no interior do Túnel Aerodinâmico Debi Pada Sadhu, deve-se calcular o número de Reynolds conforme apresentado na equação 3.8. Utilizando os valores previamente calculados chega-se a um número de Reynolds para cada velocidade estudada nos testes, conforme apresentado na tabela A.5 do Apêndice A.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão discutidos os principais resultados obtidos após os testes realizados no Túnel Aerodinâmico Debi Pada Sadhu. Com posse dos dados de C_p e λ das tabelas A.2 e A.3, do Apêndice A, é possível elaborar curvas de desempenho da turbina Savonius do presente estudo nas duas situações propostas, resultando nos gráficos apresentados nas figuras B.1 e B.2, do Apêndice B.

A partir dos dados da corrente e da tensão do circuito utilizado no estudo, foi possível calcular a potência eletromecânica atuante no circuito, tabelas A.2 e A.3. Como pode ser observado, nos valores de P_{em} calculados, a maior potência gerada foi de 0,4511 watts, valor referente à turbina eólica operando na velocidade v_e de 8,2 m/s na situação sem a utilização das pás defletoras e com uma resistência de 23,5 Ω acoplada ao circuito. Esse valor de potência representa cerca de 23% do valor previsto para a turbina Savonius estudada, conforme estimado na seção 4.3. Esse fato deve-se em parte pela eficiência da máquina elétrica utilizada nos testes ser baixa se comparada com máquinas elétricas maiores. Além disso, a inércia causada pelo rotor fabricado em MDF e a carga imposta pelo rolamento utilizado na porção inferior do eixo da turbina, influenciaram na geração de potência, pois parte da energia que poderia ser convertida em eletricidade foi perdida para que o rotor pudesse entrar em movimento.

Como pode ser observado nos resultados dos testes com a turbina Savonius sem a utilização do estator, figura B.1 do Apêndice B, obteve-se valores para a razão de velocidade de ponta entre 0 e 0,64 e valores de coeficiente de potência variando entre 0 e 0,0424. Já para o caso com a utilização dos estatores, figura B.2 do Apêndice B, a razão de velocidade de ponta variou entre 0 e 0,4 e o coeficiente de potência variou entre 0 e 0,0158. Comparando com estudos anteriores como o de Akwa, 2010, na figura A.1 do Anexo A e com o de Hayashi et al., 2005, na figura A.2 do Anexo A, não foi possível elaborar curvas completas de desempenho da turbina Savonius. Isso se deve ao fato das resistências utilizadas para o experimento não possibilitarem uma

abrangência maior na variação da rotação da turbina. Como pode ser observado nas figuras A.1 e A.2 do Anexo A, os valores de λ variam entre 0 e aproximadamente 1,5.

Como pode ser observado na figura A.1, Akwa, 2010, obteve os maiores resultados de coeficientes de potência com a turbina Savonius operando em uma razão de velocidade de ponta próximo a 1. Dessa forma, para se alcançar uma razão de velocidade ponta maior, e conseqüentemente um coeficiente de potência maior, deve-se realizar o experimento com um sistema de controle de rotação que opere em uma faixa maior de variação de rotação que os resistores utilizados no presente estudo.

Para melhor visualizar a comparação entre os resultados obtidos com o presente estudo experimental, organizou-se os maiores valores de C_p observados nos testes nas duas situações propostas, e nas quatro velocidades de vento estudadas, em um gráfico de colunas conforme apresentado na figura 5,1.

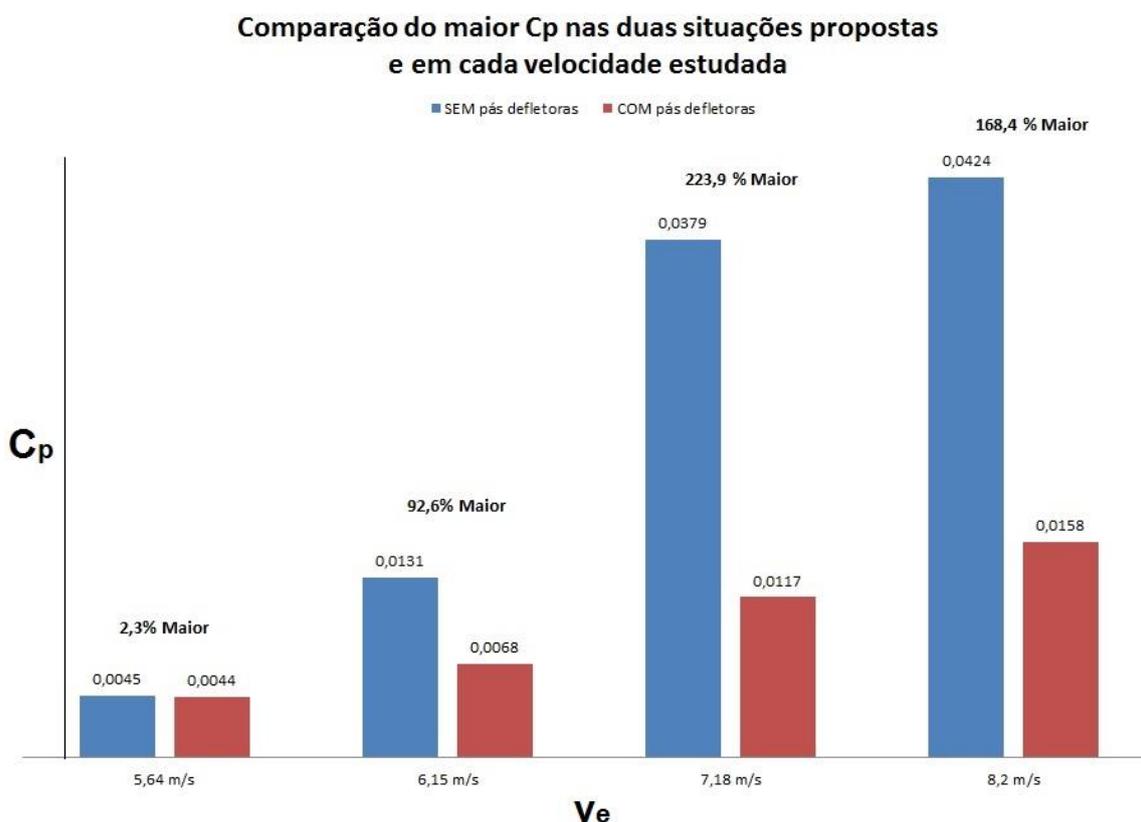


Figura 5.1 – Comparação de potência gerada.

Analisando os resultados apresentados na figura 5.1, é possível notar que em nenhuma velocidade de vento estudada a configuração da turbina eólica estudada com as pás defletoras resultou em aumento de desempenho. Como pode ser observado na maior diferença de geração de potência, teve-se uma potência gerada na velocidade de 7,18 m/s 223,9% maior no caso da turbina eólica sem as pás defletoras. Esse efeito deve-se principalmente por uma parcela do escoamento de ar através da turbina ser defletido ao se deparar com as pás do estator. Dessa forma, a energia cinética presente nessa parcela de escoamento defletida não chega à turbina eólica e, conseqüentemente, não sendo convertida em energia mecânica de rotação do eixo e nem em energia elétrica pela ação da máquina elétrica acoplada ao dito eixo e operando em modo gerador. Sendo assim, uma análise dos custos relativos a

utilização de um estator formado por quatro pás defletoras foi descartada, pois não houve aumento no desempenho da turbina Savonius estudada.

Como pode ser observado nas figuras A.1 e A.2 do Anexo A esse comportamento já foi observado por Akwa, 2010, em um estudo numérico e por Hayashi et al., 2005, em um estudo experimental. No caso apresentado na figura 5.1a, apenas em uma faixa de λ próximo a 1 o valor de C_p é superior com a utilização de um estator com quatro pás defletoras se comparado com a turbina Savonius operando com outros tipos de estatores e livre. No entanto, como pode ser visualizado na figura 5.1b Hayashi et al., 2005, encontraram valores de C_p superiores para o caso da turbina Savonius operando livre, sendo todas as curvas abaixo daquela com maior desempenho ilustrando o desempenho da mesma turbina Savonius com diferentes tipos de estatores. Para o estudo realizado por Hayashi et al., 2005, foi utilizado 3,5% da área da seção de testes túnel aerodinâmico, não sendo necessárias correções nas velocidades estudadas.

6. CONCLUSÃO

Apesar dos resultados encontrados para a potência gerada no circuito dos testes não se aproximar do valor estimado, a tendência encontrada nos resultados para o coeficiente de potência em função da razão de velocidade de ponta foram satisfatórios se comparados com os demais estudos na área realizados por outros autores. Além disso, foi possível desenvolver conhecimentos na área de energia eólica referente a metodologia de estudos experimentais, dimensionamento de turbinas Savonius e fabricação de modelos para estudos experimentais.

Com base nos testes realizados no Túnel Aerodinâmico Debi Pada Sadhu com um modelo de turbina eólica tipo Savonius utilizando um estator compreendo quatro pás defletoras, chegou-se que em nenhuma velocidade de vento incidente sobre a dita turbina obteve-se ganho de desempenho. Sendo assim, conclui-se que não é vantajosa a utilização de um estator de quatro pás defletoras em uma turbina Savonius.

Akwa, 2010, observou um aumento no desempenho da turbina eólica utilizada em seu estudo apenas numa faixa próxima a $\lambda=1$ e concluiu que “para não se perder as características vantajosas de baixo custo e de simplicidade para o rotor Savonius, recomenda-se o uso do mesmo sem estatores”. Apesar de o presente estudo experimental apresentar diferenças nas proporções de potência gerada nas duas situações propostas, ocasionadas em grande parte por perdas devido à inércia do modelo e atrito no rolamento, chegou-se a mesma conclusão sobre a utilização de estatores formados por quatro pás defletoras.

Visando um aprimoramento no presente estudo experimental, propõe-se futuros trabalhos utilizando medições mecânicas para o levantamento das curvas de desempenho, como por exemplo, a medição de torque estático. Assim, descarta-se a influência da eficiência de máquinas elétricas na conversão da energia mecânica de rotação em energia elétrica. Além disso, pode-se projetar um modelo utilizando matérias que impõem uma menor inércia ao rotor e utilizando rolamentos mais adequados para a aplicação, como rolamentos axiais na porção inferior do rotor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akwa, J. V.; **“Análise Aerodinâmica de Turbinas Eólicas Savonius Empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional”**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

Carvalho, P.; **“Geração Eólica”**, Imprensa Universitária, 2003.

Custódio, R. S.; **“Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica”**, Eletrobrás, 2009.

Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; McDonald, A. T.; **“Introdução à Mecânica dos Fluidos”**, LTC, 7ª edição, 2010.

Fujisawa, N.; **“On the torque mechanism of Savonius rotors”**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991.

Hayashi, T.; Li, Y.; Hara, Y.; **“Wind Tunnel Tests on a Different Phase Three-Stage Savonius Rotor”**, JSME International Journal, Vol. 48, No. 1, 2005.

Kamoji, M. A.; Kedare, S. B.; Prabhu, S. V.; **“Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor”**, Elsevier Ltd., 2008.

Pope, A.; Harper, J. J.; **“Low Speed Wind Tunnel Testing”**, John Wiley & Sons, 1966.

Saha, U. K.; Thotla, S.; Maity, D.; **“Optimum design configuration os Savonius rotor through wind tunnel experiments”**, Elsevier Ltd., 2008.

Ushiyama, I.; Hiroshi, N.; Jinkichi, S.; **“Experimentally Determining the Optimum Design Configuration for Savonius Rotors”**, Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 258, 1986.

Tabela A.3 – Dados com pás

DADOS ADQUIRIDOS - ESTATOR COM PÁS DEFLETORAS												
FREQUÊNCIA [hz]	Von [m/s]	RESISTÊNCIA [Ω]	TENSÃO [V]	CORRENTE [mA]	Pem [W]	Pe [W]	Cp	ωmin [rpm]	ωmax [rpm]	ωmed [rpm]	ωmed [rad/s]	λ
29,15	5,64	23,5	0,7216	21,021	0,0152	3,46	0,0044	244	233	238,5	24,97	0,20
		18,8	0,4604	17,368	0,0080		0,0023	207	200	203,5	21,31	0,17
		14,1	0,5453	28,195	0,0154		0,0044	266	271	268,5	28,12	0,22
		9,4	0,4411	28,640	0,0126		0,0037	270	266	268	28,06	0,22
		4,7	0,3204	32,462	0,0104		0,0030	260	255,5	257,75	26,99	0,22
		0	2,4662	0	0		0,0000	380	374,5	377,25	39,50	0,32
		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
31,5	6,15	23,5	0,8619	35,344	0,0305	4,48	0,0068	346	341	343,5	35,97	0,26
		18,8	0,7542	30,920	0,0233		0,0052	342	329,5	335,75	35,16	0,26
		14,1	0,6148	32,672	0,0201		0,0045	333	330	331,5	34,71	0,25
		9,4	0,5462	33,855	0,0185		0,0041	317	313,5	315,25	33,01	0,24
		4,7	0,4179	38,020	0,0159		0,0035	278	285	281,5	29,48	0,22
		0	4,9260	0	0		0,0000	806	801,5	803,75	84,17	0,62
		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
38,6	7,18	23,5	1,5501	53,827	0,0834	7,14	0,0117	551	542,5	546,75	57,25	0,36
		18,8	1,3277	57,571	0,0764		0,0107	517	511	514	53,82	0,34
		14,1	1,1789	62,642	0,0738		0,0103	480	487	483,5	50,63	0,32
		9,4	0,7728	67,814	0,0524		0,0073	471	466,5	468,75	49,09	0,31
		4,7	0,7859	69,338	0,0545		0,0076	455	449	452	47,33	0,30
		0	7,7150	0	0		0,0000	1254	1247,5	1250,75	130,97	0,82
		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
43,4	8,20	23,5	2,1199	78,995	0,1675	10,63	0,0158	702	686	694	72,67	0,40
		18,8	1,9679	79,026	0,1555		0,0146	657	643	650	68,07	0,37
		14,1	1,5582	85,081	0,1326		0,0125	654	647	650,5	68,12	0,37
		9,4	1,2618	89,064	0,1124		0,0106	593	580,5	586,75	61,44	0,34
		4,7	0,9746	89,642	0,0874		0,0082	574	565	569,5	59,64	0,33
		0	9,2270	0	0		0,0000	1496	1489,5	1492,75	156,32	0,86
		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0

Tabela A.4 – Velocidade corrigida.

FREQUÊNCIA [hz]	Von [m/s]	Ve [m/s]
29,15	5,50	5,64
31,50	6,00	6,15
38,60	7,00	7,18
43,40	8,00	8,20

Tabela A.5 – Número de Reynolds para as velocidades de estudo.

Ve [m/s]	Re
5,64	33419,79
6,15	36457,95
7,18	42534,28
8,20	48610,60

APÊNDICE B

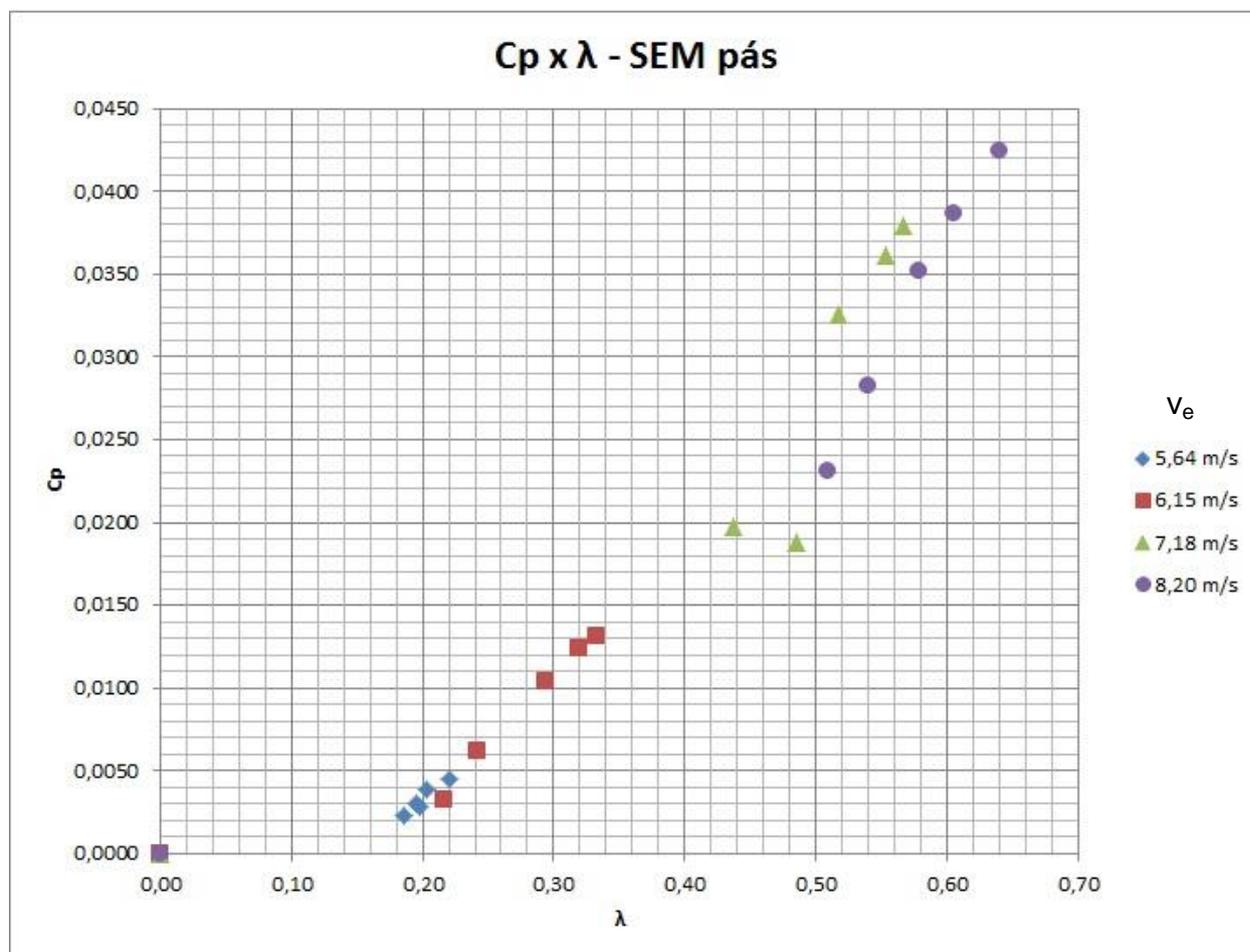


Figura B.1 - Gráfico do coeficiente de potência em função da razão de velocidade de ponta na situação de testes sem as pás defletoras.

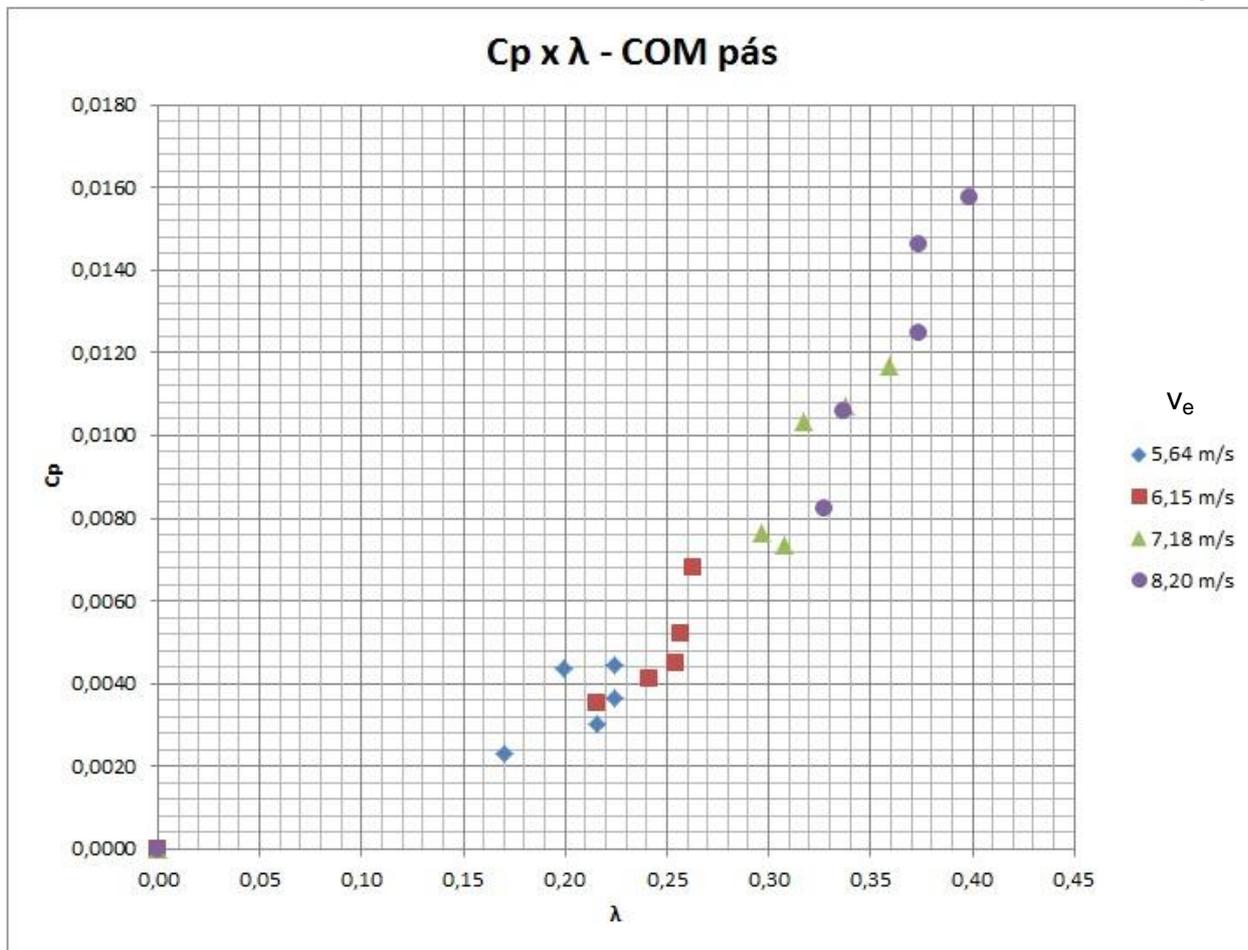


Figura B.2 – Gráfico do coeficiente de potência em função da razão de velocidade de ponta na situação de testes com as pás defletoras.

ANEXO A

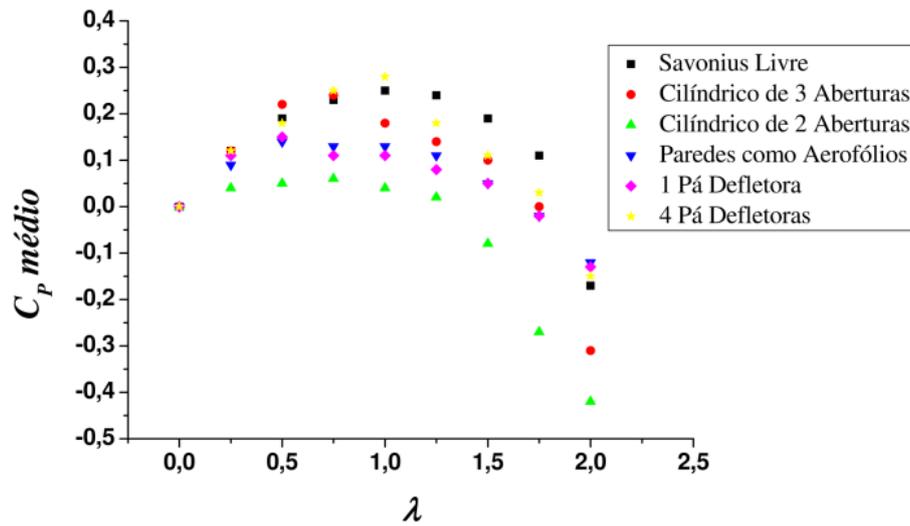


Figura A.1 – Estudo numérico de uma turbina Savonius com estatores (Adaptado de Akwa, 2010).

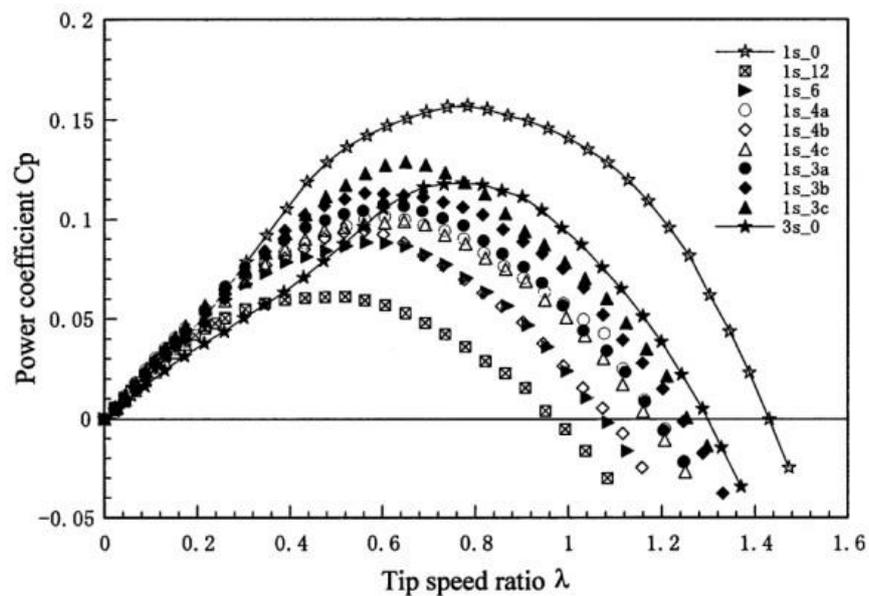


Figura A.2 - Estudo experimental de uma turbina Savonius com estatores (Adaptado de Hayashi et al., 2005).