

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

LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA DE UMA TURBINA
EÓLICA DO TIPO DARRIEUS EM LABORATÓRIO

por

Jônatan Pezzi de Oliveira

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, julho de 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA DE UMA TURBINA
EÓLICA DO TIPO DARRIEUS EM LABORATÓRIO

por

Jônatan Pezzi de Oliveira

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.^a Dr.^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof.^a Dr.^a Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Dr. Volnei Borges

Prof.^a Dr.^a Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 07 de julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Jairo e Salete, pela dedicação e apoio durante toda a minha formação.

Ao professor Alexandre Vagtinski de Paula, pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Ao Leonardo Brito Kothe, por toda a ajuda com a instalação dos instrumentos e pelas dúvidas respondidas.

Aos laboratórios de Aplicações em Energia e Fenômenos de Transporte (LAEFT), de mecânica dos Fluidos (LMF) e de Ensaio Térmico e Aerodinâmico (LETA) da UFRGS, por disponibilizarem os instrumentos e instalações necessários para a realização dos experimentos deste trabalho.

Aos familiares e amigos pelo suporte e incentivo durante toda a graduação.

OLIVEIRA, J. P. **Levantamento das Curvas de Torque e Potência de uma Turbina Eólica do Tipo Darrieus em Laboratório**. 2017. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis vem ganhando espaço nas últimas décadas em todo o mundo, e a energia eólica tem sido o foco de diversos estudos. Turbinas eólicas de eixo horizontal de grande porte foram estudadas por diversos pesquisadores devido a sua elevada eficiência na conversão de energia em grandes parques. Porém, turbinas eólicas de eixo vertical têm recebido foco em estudos recentes, que propõem a sua aplicação em ambientes urbanos, no topo de edificações, em conjunto com um sistema estator que busca o aumento de sua eficiência. Este trabalho apresenta um estudo experimental do desempenho de uma turbina eólica de eixo vertical Darrieus de pás retas (tipo H) com cinco pás, montada sobre uma estrutura que busca simular o efeito do topo de uma edificação, com um estator de oito pás aplicado à turbina. O objetivo do trabalho é o levantamento das curvas de torque estático, coeficiente de torque estático, coeficiente de torque dinâmico, coeficiente de potência e de potência da turbina. A metodologia aplicada foi a medição de torque por um sistema de peso variável, polia e balança de tração e da velocidade de rotação por um tacômetro, no eixo de um modelo reduzido da turbina, submetido a um escoamento de ar em túnel aerodinâmico, de modo que sejam obtidas as curvas de desempenho da máquina para diversas velocidades do vento e diferentes cargas aplicadas ao eixo. O método utilizado neste trabalho mostrou-se eficiente para a análise do desempenho dinâmico da turbina, com as curvas do desempenho dinâmico da turbina atendendo ao esperado pela literatura. Porém, houve uma incerteza de medição maior para os pontos de baixa potência no eixo da turbina devido às limitações da balança de tração. Para a análise do desempenho estático da turbina, o método se mostrou deficiente, visto que a incerteza de medição aumentou consideravelmente para a curva de coeficiente de torque estático, o que impossibilitou uma conclusão sobre o seu comportamento. O coeficiente de torque foi máximo para uma razão de velocidade de ponta de pá de 0,09, com um valor de 0,041. A curva do coeficiente de potência apresentou um ponto de máximo de 0,019 para uma razão de velocidade de ponta de pá de 0,56. A potência máxima foi de 0,153 W para uma rotação de 358 RPM e velocidade do vento de 7,3 m/s. O torque estático máximo encontrado foi de 0,011 Nm para uma velocidade do escoamento de 9,1 m/s.

PALAVRAS-CHAVE: Turbina eólica, curva de potência, túnel aerodinâmico, energia eólica.

OLIVEIRA, J. P. **Survey of Torque and Power Curves of a Darrieus Type Wind Turbine in Laboratory**. 2017. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

Generation of electricity from renewable sources has gained ground in recent decades all over the world, and wind energy has been the focus of several studies. Large horizontal axis wind turbines have been studied by several researchers due to their high efficiency in the conversion of energy in large wind farms. However, vertical axis wind turbines have received focus in recent studies, which propose their application in urban environments, on top of buildings, in conjunction with a stator system that seeks to increase their efficiency. This work presents an experimental study of the performance of a Darrieus vertical axis wind turbine (type H) with five blades, mounted on a structure that seeks to simulate the effect of the top of a building, with an eight-blade power-augmentation-guide-vane applied to the turbine. The objective of the work is to survey the curves of static torque, static torque coefficient, dynamic torque coefficient, power coefficient and turbine power. The methodology applied was the measurement of torque by a variable weight, pulley and digital traction scale system and the speed of rotation by a tachometer, on the axis of a reduced model of the turbine, subjected to an aerodynamic tunnel air flow, so that the machine performance curves for various wind speeds and different loads applied to the shaft are obtained. The method used in this work was efficient for the analysis of the dynamic performance of the turbine, with the curves of the dynamic performance of the turbine in accordance with the literature. However, there was a greater measurement uncertainty for the points of low power on the turbine shaft due to the limitations of the digital traction scale. For the analysis of the static performance of the turbine, the method proved to be deficient, since the measurement uncertainty increased considerably for the static torque coefficient curve, which made it impossible to make any conclusions about its behavior. The torque coefficient was maximum for a blade tip speed ratio of 0.9, with a value of 0.041. The power coefficient curve showed a maximum point of 0.019 for a blade tip speed ratio of 0.56. The maximum power was 0.153 W for a rotation speed of 358 RPM and wind speed of 7.3 m/s. The maximum static torque found was 0.011 Nm for a flow velocity of 9.1 m/s.

KEYWORDS: Wind turbine, power curve, wind tunnel, wind power.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Justificativa	1
1.3. Objetivos.....	1
1.3.1. Objetivo Geral.....	1
1.3.2. Objetivos Específicos.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1. Recurso Eólico.....	3
3.2. Potência Eólica e Coeficiente de Potência.....	3
3.3. Torque e Coeficiente de Torque	4
3.4. Turbinas Eólicas de Eixo Vertical.....	5
3.5. Medição de Torque.....	5
4. METODOLOGIA	6
4.1. Túnel Aerodinâmico.....	6
4.2. Perfis de Velocidade do Túnel Aerodinâmico.....	7
4.3. Turbina Eólica.....	7
4.4. Estator	8
4.5. Sistema para Medição de Torque	8
4.6. Levantamento das Curvas de Desempenho	9
4.7. Equipamentos Utilizados nas Medições.....	10
5. RESULTADOS	11
5.1. Torque Estático.....	11
5.2. Torque Dinâmico	12
5.3. Potência.....	13
6. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS.....	14
APÊNDICE A - ANÁLISE DE INCERTEZAS	16
ANEXO A – FOTO TACÔMETRO DIGITAL MINIPA MDT-2244B	18
ANEXO B – MULTÍMETRO DIGITAL MINIPA ET- 2652.....	19

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

A geração de energia elétrica é um importante elemento da economia mundial e tem sido o foco de diversas pesquisas, motivadas pelo aumento contínuo da demanda por energia, e também pela busca por fontes mais limpas como uma forma de diminuir o impacto ambiental causado pelas emissões de gases poluentes [Goldemberg e Villanueva, 2003]. Nessa busca por fontes limpas e renováveis de energia, a energia eólica tem tido destaque nos últimos anos. O uso do vento como fonte de energia, porém, não é algo novo, tendo-se como primeiro registro histórico a utilização da energia eólica para o bombeamento de água e moagem de grãos através de cataventos na Pérsia, por volta de 200 a.C. No retorno das Cruzadas, há cerca de 900 anos, houve a introdução dos cataventos na Europa e no século VII começaram a ser utilizados moinhos de eixo horizontal na Inglaterra, França e Holanda [CRESESB, 2008].

Ao final do ano de 2016 o Brasil possuía 10,75 GW de potência eólica instalada, um aumento de 23,06% em relação a dezembro de 2015. Essa capacidade representou 7,1% da matriz elétrica brasileira em 2016, posicionando o Brasil na 9ª posição do ranking de países com maior potência eólica instalada no mundo. A previsão é de que a capacidade instalada no Brasil alcance 17.299 MW até o final de 2020 [ABEEólica, 2017a].

Atualmente, a maior parte da energia elétrica convertida da fonte eólica no mundo é gerada em parques eólicos de grande porte, que normalmente se localizam em zonas afastadas dos centros consumidores. Essa distância entre a fonte e região consumidora acarreta em alguns problemas, em relação à transmissão, logística no transporte e em problemas ambientais [ABEEólica, 2017b]. Uma forma de evitar os problemas relacionados à transmissão e logística é a geração de energia elétrica a partir da fonte eólica em centros urbanos, no topo de edifícios. As turbinas eólicas de eixo vertical de pequeno porte surgem então como alternativa para a geração de energia elétrica em cidades por possuírem melhor resposta às condições de vento turbulento encontrados em regiões edificadas [Toja-Silva *et al.*, 2013; Chong *et al.*, 2013].

1.2. Justificativa

Com a possibilidade da instalação de turbinas eólicas de eixo vertical no topo de edificações a fim de aproximar a geração e o consumo da energia elétrica e reduzir as perdas por transmissão, promovendo um aumento da eficiência do sistema como um todo, surge a necessidade de um melhor entendimento do funcionamento destes tipos de turbinas em ambiente urbano. Toja-Silva *et al.*, 2013, apontam a existência dessa necessidade e recomendam que estudos qualitativos e quantitativos de diferentes tipos de turbinas sejam realizados, especialmente de turbinas eólicas de eixo vertical.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

O presente trabalho busca aplicar uma metodologia experimental para que seja realizado de modo simples, e com custo baixo, o levantamento das curvas de torque estático, coeficiente de torque dinâmico, potência e coeficiente de potência de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus com pás retas em laboratório.

Através de medições de torque e de velocidade de rotação no eixo de um modelo reduzido da turbina submetido a escoamento de ar em túnel aerodinâmico, podem ser obtidas as curvas de torque e potência da máquina para diversas velocidades do vento e cargas aplicadas ao eixo.

A turbina estudada neste trabalho foi montada sobre uma estrutura que busca simular o topo de uma edificação, e envolvida por um direcionador de escoamento ou estator que tem por objetivo melhorar o desempenho da turbina em ambientes urbanos. A

característica de melhora no desempenho da turbina por efeito do estator não é o escopo deste trabalho.

1.3.2. Objetivos Específicos

De forma resumida, os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Construção de um sistema de peso variável, barbante e polia para aplicação de torque no eixo da turbina;
- Experimentação da turbina Darrieus tipo H em túnel aerodinâmico, submetida a diversas velocidades de vento e diversas cargas aplicadas ao eixo;
- Medição do torque aplicado na turbina com o uso de um sistema de peso variável e de uma balança digital;
- Medição da velocidade rotacional da turbina por um tacômetro;
- Levantamento das curvas de torque estático, coeficiente de torque estático, coeficiente de torque dinâmico, potência e coeficiente de potência da turbina em estudo a partir das variáveis mensuradas experimentalmente, com o intuito de contribuir para o entendimento do desempenho da máquina durante sua operação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos onde foram realizados estudos do desempenho de turbinas eólicas de eixo vertical, e estudos comparativos da instalação de dispositivos estatores nestes tipos de turbinas.

Chong *et al.*, 2011, estudaram a viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema de energia renovável híbrido solar-eólico para a geração de energia elétrica no topo de edificações altas. O sistema consiste de uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV) com rotor tipo H, um estator, painéis solares e coletores de água da chuva. O objetivo do sistema é fornecer energia de fontes renováveis ao edifício, com o estator melhorando o desempenho da turbina por aumentar a velocidade de chegada do vento e guiando o escoamento para as pás de avanço da turbina. Em Chong *et al.*, 2013, foi investigado de maneira experimental e com simulação numérica o desempenho de uma TEEV H-Darrieus de cinco pás aplicada no sistema híbrido proposto em 2011, com um novo modelo de estator projetado visando a redução de custos, comparando o desempenho da turbina com e sem o estator. Para uma velocidade do vento de 6 m/s, a aplicação do estator resultou em um aumento de 182% da velocidade de rotação da turbina na ausência de carga e a potência na condição de máximo torque alcançou uma razão de aumento de 3,48.

Kothe, 2016, realizou um estudo experimental e numérico do desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas de eixo vertical com rotores Savonius helicoidal e de duplo-estágio. O estudo experimental foi realizado no túnel aerodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS. Foram comparados os coeficientes de torque estático e dinâmico e o coeficiente de potência, e também foi realizada uma análise aerodinâmica das duas turbinas. As medições de velocidade do ar foram realizadas empregando Tubos de Pitot, de torque estático por um torquímetro digital e do torque dinâmico por torquímetro simples construído para a medição, que utilizou o método da medição por absorção através da aplicação de uma carga frenante no eixo por um barbante. As turbinas foram fabricadas através da técnica de prototipagem 3D. Foram realizadas análises dos rotores na forma estática para diferentes ângulos de incidência e com a turbina em rotação para diferentes razões de velocidades de ponta de pá (λ).

No projeto de Alé *et al.*, 2007, foram construídos protótipos de diversos rotores de turbinas eólicas de eixo vertical de pequeno porte. O foco do projeto foi a construção de dois protótipos de TEEV, uma com pás retas de alta solidez e outra de pás helicoidais. A metodologia empregada para a análise do desempenho foi experimentação em túnel de vento e testes com gerador elétrico em uma bancada de laboratório. Os melhores resultados da metodologia foram obtidos para o rotor de pás retas de alta solidez, com curvas de coeficiente de potência e de coeficiente de torque similares às obtidas em Garcia *et al.*, 2006. Por fim, foi

comentado brevemente sobre estruturas para a instalação e testes dos dois rotores em campo para comparação com os resultados de laboratório.

Fiabani, 2016, construiu e experimentou no túnel aerodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS uma turbina eólica H-Darrieus de 5 pás, comparando o desempenho da turbina com o estator proposto por Chong *et al.*, 2013, e um novo estator com guias modificadas que buscou otimizar o desempenho da turbina. A turbina e os estatores foram construídos em escala reduzida devido às limitações de dimensão do túnel aerodinâmico. Foi também construído um gerador elétrico com 8 ímãs permanentes de neodímio e 8 bobinas de fio de cobre esmaltado. Com a turbina acoplada ao gerador, foi aplicada uma carga resistiva simples com o sistema submetido ao escoamento de ar no túnel aerodinâmico, e foram levantadas as curvas de potência e de coeficiente de potência do sistema a partir da medição da rotação da turbina por um tacômetro digital e da tensão e corrente elétricas no gerador por multímetros digitais. Para uma velocidade do escoamento de ar de aproximadamente 8 m/s, o novo estator proposto alcançou um aumento de 45% da potência convertida em relação ao estator proposto por Chong *et al.*, 2013.

O presente trabalho busca aplicar uma metodologia simples para a determinação das curvas de desempenho da turbina desenvolvida por Fiabani, 2016, de modo que sejam conhecidas as características desta turbina, possibilitando uma análise mais aprofundada com equipamentos mais sofisticados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta alguns conceitos básicos de energia eólica e de torque e sua medição, para o entendimento do problema em estudo e da metodologia empregada.

3.1. Recurso Eólico

De acordo com Castro, 2003, a origem do vento é a radiação solar, uma vez que os ventos são massas de ar que se movimentam devido às diferenças de pressão na superfície terrestre, causadas pelo aquecimento desigual da Terra. Esse aquecimento diferenciado da atmosfera ocorre porque existe uma variação na orientação dos raios solares ao longo da superfície, e também devido aos movimentos da Terra. Estes mecanismos são os responsáveis pelo comportamento dos ventos que sopram em escala global. Porém, existem os ventos que se manifestam em pequena escala, e estes são influenciados por diferentes aspectos, dentre os quais se destacam a altura, a rugosidade do terreno, os obstáculos e o relevo [CRESESB, 2008].

3.2. Potência Eólica e Coeficiente de Potência

Energia eólica é definida como a energia cinética das massas de ar em movimento na superfície terrestre e o seu aproveitamento acontece através da conversão dessa energia dos ventos em energia mecânica com a rotação de um rotor.

Segundo Castro, 2003, a energia cinética de uma massa de ar que se move a uma velocidade uniforme e constante pode ser calculada por

$$E_C = \frac{1}{2}mU^2, \quad (3.1)$$

na qual E_C é a energia cinética [J], m é a massa de ar [kg] e U é a velocidade da massa de ar [m/s].

Para a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica de uma turbina eólica, é necessário o cálculo da potência disponível na coluna de ar que atravessa a seção da turbina. A partir da Equação 3.1 e da relação entre energia e potência, pode-se demonstrar que a potência disponível no vento que passa por uma turbina é dada por

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A U^3, \quad (3.2)$$

na qual P_d é a potência disponível [W], ρ é a massa específica do ar [kg/m^3] e A é a área da seção da turbina transversal ao escoamento [m^2].

A Equação 3.2 determina a potência disponível no vento na ausência da turbina. Porém, a potência não pode ser totalmente convertida em potência mecânica do eixo da turbina, uma vez que o ar deve sair com velocidade não nula após atravessar o plano das pás. A razão entre a potência extraída por uma turbina e a potência disponível na coluna de ar que passa por ela é chamada de coeficiente de potência, e é um número adimensional que indica a eficiência da turbina. Com a aplicação de conceitos da mecânica dos fluidos, é possível demonstrar a existência de um máximo teórico para o rendimento da conversão da potência, chamado de Limite de Betz. O valor do Limite de Betz é $16/27$, ou aproximadamente 59,3%, para uma redução da velocidade do escoamento de ar na saída da máquina para um terço da velocidade da corrente livre [CRESESB, 2008].

Máquinas reais possuem uma eficiência menor que o Limite de Betz, e esta eficiência depende de diversos fatores, como o tipo de turbina, a velocidade do vento, a velocidade de rotação da turbina, entre outros. A partir da aplicação do rendimento da conversão da potência na Equação 3.2, obtém-se a equação que determina a potência extraída por uma turbina eólica

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho A U^3 c_p, \quad (3.3)$$

na qual P_{ext} é a potência extraída pela turbina [W] e c_p é o coeficiente de potência.

Para estudos comparativos de desempenho entre diferentes tipos e dimensões de turbinas eólicas, além do coeficiente de potência, é comumente calculada a razão de velocidade de ponta de pá, que é uma grandeza adimensional que indica a razão entre a velocidade tangencial no ponto da pá da turbina mais afastado do eixo de rotação e a velocidade de corrente livre do vento

$$\lambda = \frac{\omega R_r}{U_\infty}, \quad (3.4)$$

na qual λ é a razão de velocidade de ponta de pá, ω é a velocidade angular do rotor [rad/s], R_r é o raio do rotor [m] e U_∞ é a velocidade de corrente livre do escoamento de ar [m/s].

3.3. Torque e Coeficiente de Torque

O torque ou momento de alavanca é uma grandeza vetorial que pode ser descrita como a tendência de uma força em rotacionar um objeto ao redor de um eixo. Segundo Halliday *et al.*, 2009, o torque é definido a partir da componente perpendicular a um eixo de rotação da força aplicada sobre um objeto, que é efetivamente utilizada para fazê-lo girar em torno deste eixo ou ponto central de rotação. A distância do ponto de rotação ao ponto onde atua uma força é chamada de braço de alavanca. O produto vetorial do braço de alavanca pela força define o torque. No caso em que a força atuante é perpendicular ao eixo de rotação, o módulo do torque pode ser calculado por

$$T = rF, \quad (3.5)$$

na qual T é o torque [Nm], r é o braço de alavanca da força [m] e F é a força [N].

Assim como no caso do coeficiente de potência, para a comparação do torque de diferentes turbinas eólicas é utilizado o coeficiente de torque, dado por

$$c_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 AR}, \quad (3.6)$$

na qual c_T é o coeficiente de torque.

3.4. Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

A turbina eólica ou aerogerador é uma máquina que capta parte da potência cinética presente no vento através de um rotor, convertendo em potência mecânica de eixo devido às forças aerodinâmicas no rotor. A potência mecânica pode então ser convertida em potência elétrica através de um gerador elétrico.

As turbinas eólicas são classificadas em dois tipos de acordo com a sua construção, podendo ser turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) e turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV). As TEEH são geralmente movidas devido às forças de sustentação (*lift*). São comuns em grandes parques eólicos e geralmente construídas com a configuração de três pás. São utilizadas nessa configuração devido ao alto rendimento, estabilidade, alta capacidade de potência e eficiência na conversão elétrica, mas necessitam de um constante posicionamento na direção de incidência do vento e necessitam de altos requisitos tecnológicos [CRESESB, 2008].

Os rotores de eixo vertical podem ser movidos por forças de sustentação e por forças de arrasto (*drag*). Possuem as vantagens de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento e possibilidade de instalação junto ao solo de todo o equipamento de conversão da energia mecânica em elétrica, o que reduz a complexidade do projeto. Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus e Savonius. Os rotores do tipo Darrieus são movidos por forças de sustentação e na forma padrão constituem-se de múltiplas (duas ou três) pás curvas de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao um eixo vertical. Modelos simplificados de rotores Darrieus podem ter as pás retas, sendo então denominadas como turbinas do tipo H [Garcia *et al.*, 2006].

3.5. Medição de Torque

Com a necessidade da mensuração do torque em eixos de máquinas no período da revolução industrial, o físico francês Gaspar de Prony (1755–1839) desenvolveu um método para a medição do torque em um eixo em rotação a partir de um sistema de absorção de energia. Com o uso de um braço de alavanca com propriedades conhecidas, conectado a um sistema de quantificação de força, como um dinamômetro convencional ou uma balança, por meio da frenagem do eixo, o torque pode ser medido. Esse sistema ficou conhecido como “freio de Prony” (*Prony brake*) e nas décadas posteriores foi largamente utilizado. Outros sistemas de medição por absorção foram posteriormente desenvolvidos por outros pesquisadores [Borges *et al.*, 2015].

Borges *et al.*, 2015, citam que métodos de medição de torque estático extremamente difundidos são os que utilizam extensômetros de resistência elétrica. Quando posicionados de modo a formar 45° em relação à direção axial do eixo, pois é nesta linha de atuação que temos a maior deformação na estrutura de um eixo sob torção, é possível medir-se a deformação, que é então relacionada com o torque aplicado ao eixo. Existem também métodos que utilizam sensores piezoelétricos, que são elementos que geram uma diferença de potencial elétrica quando submetidos à deformação mecânica. Porém todos esses métodos que utilizam transdutores de deslocamento possuem certa dificuldade quando aplicados a eixos em rotação, devido à necessidade de alimentação no caso de extensômetros, e a leitura da variação da tensão elétrica de saída destes sistemas, visto que a rotação impossibilita o uso de fios ligados a elementos externos ao eixo.

Técnicas que permitem a utilização de transdutores de deslocamento em eixos em rotação também são citadas por Borges *et al.*, 2015, que incluem a de anéis coletores, que

fixados radialmente ao eixo atiram com escovas de grafite, permitindo a alimentação do circuito e recepção dos sinais de leitura de tensão. A desvantagem deste método é que o desgaste e aquecimento das escovas de grafite introduz ruído no sistema, reduzindo a precisão da medição. Outra técnica utiliza transformadores circulares no lugar dos anéis coletores, eliminando o problema do desgaste. Porém, esse sistema é suscetível a ruídos e erros causados pelo alinhamento entre as bobinas do transformador, e a minimização destes erros torna esta técnica consideravelmente mais cara. Outras técnicas utilizam alimentação por baterias e realizam a transmissão dos dados de leitura por sinais sem fio. Estas técnicas contornam os problemas das outras, mas possuem suas desvantagens, como a introdução de massa desbalanceada ao eixo em rotação e a necessidade de troca das baterias.

4. METODOLOGIA

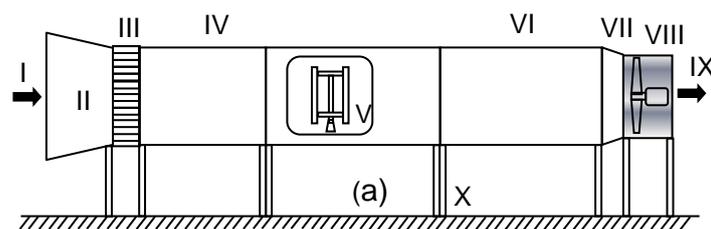
A metodologia do presente trabalho consiste na experimentação de uma TEEV Darrieus tipo H em um túnel aerodinâmico, para o levantamento de suas curvas de desempenho. Nesta seção, serão descritos todos os passos necessários para a realização dos experimentos, a construção e modo de funcionamento do sistema para medição do torque, outros equipamentos utilizados para as medições e demais aspectos pertinentes.

4.1. Túnel Aerodinâmico

Túnel aerodinâmico é uma instalação que tem por objetivo simular o efeito do movimento do ar sobre objetos. Consiste de um duto (túnel) onde o ar entra, passa por uma seção de estabilização do escoamento e flui pelo objeto em estudo, devido à sucção proveniente de um ventilador [Barlow, 1999].

O túnel utilizado para as experimentações descritas no presente trabalho foi o túnel aerodinâmico Professor Debi Pada Sadhu, Figura 4.1, localizado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS (LMF), que permite o estudo de escoamentos de ar sobre os mais diversos tipos de estruturas e perfis aerodinâmicos.

O túnel do LMF é de sucção e circuito aberto, com tomada de ar ambiente na seção de entrada, que é movimentado por um ventilador axial na saída. Tem uma seção transversal de 1 x 1 m e 6,25 m de comprimento. Na seção de entrada possui um bocal protegido por uma tela, seguido de uma câmara com tubos para a homogeneização do escoamento (favo de mel). A seção de testes se encontra a 3 m da entrada e possui 1,2 m de comprimento. O ventilador axial possui 12 pás e é acionado por um motor elétrico de 5,5 kW de potência.



Legenda da Figura 4.1a:



- I - Entrada de ar.
- II - Bocal convergente.
- III - Homogeneizador de escoamento (favo de mel).
- IV - Seção constante do canal aerodinâmico.
- V - Seção de testes com o modelo a ser testado.
- VI - Seção constante do canal aerodinâmico.
- VII - Bocal convergente de lona.
- VIII - Ventilador axial com motor de 5,5 kW.
- IX - Saída de ar.
- X - Estrutura de sustentação do canal aerodinâmico.

Figura 4.1 - Túnel aerodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS. (a) Modelo esquemático do túnel [Adaptado de Fiabani, 2016] e (b) Fotografia do túnel.

O controle da velocidade do escoamento de ar no túnel é realizado através de um controle da rotação do ventilador por um inversor de frequência, que elimina os efeitos da oscilação da tensão da rede elétrica sobre a rotação do ventilador e permite um controle preciso da rotação. O inversor permite uma variação da frequência de 0 a 60 Hz. A rotação máxima do motor do ventilador exaustor é de 1160 RPM para uma frequência de 60 Hz.

4.2. Perfis de Velocidade do Túnel Aerodinâmico

Os perfis de velocidade transversal da seção de testes do túnel aerodinâmico do LMF, levantado por Garré, 2015, a partir da medição da velocidade em diversos pontos distintos da seção do túnel são apresentados na Figura 4.2 para as frequências de 20 e 40 Hz de alimentação do motor elétrico. Os perfis de velocidade não são uniformes, devido à presença de camada limite próximo as paredes do túnel. Porém, a região central da seção de testes possui variação suave da velocidade, com valor médio de 3,5 m/s para 20 Hz e 7,5 m/s para 40 Hz, permitindo a realização de estudos qualitativos e quantitativos para diversas velocidades do escoamento de ar.

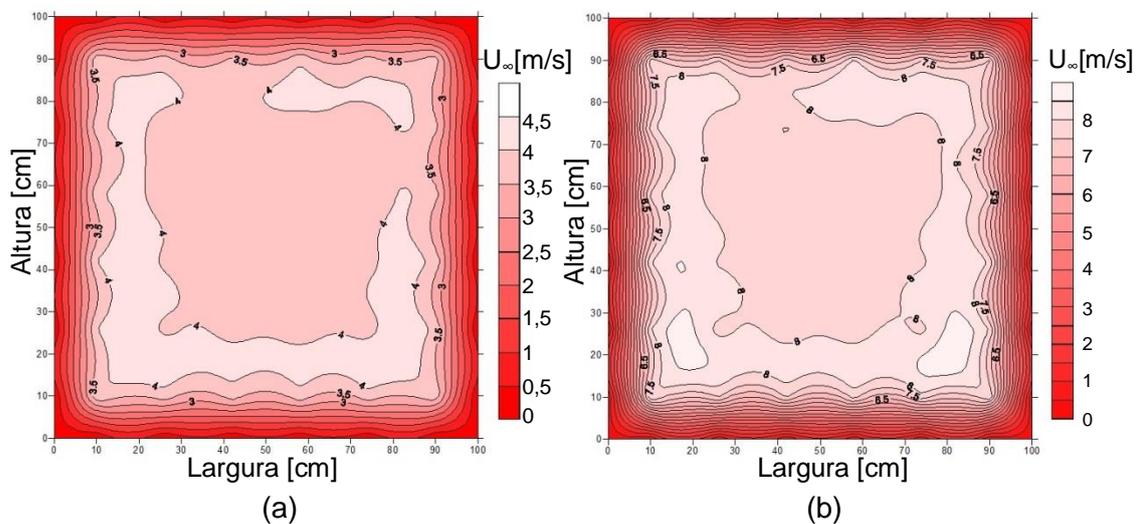


Figura 4.2 – Perfis de velocidade transversal da seção de testes do túnel aerodinâmico do LMF [Garré, 2015]: (a) 20 Hz e (b) 40 Hz.

4.3. Turbina Eólica

A turbina eólica utilizada como objeto de estudo deste trabalho foi desenvolvida em um projeto de iniciação científica por Fiabani, 2016, e é baseada na turbina eólica projetada por Chong *et al.*, 2013. Trata-se de uma TEEV Darrieus tipo H com cinco pás, ilustrada na Figura 4.3

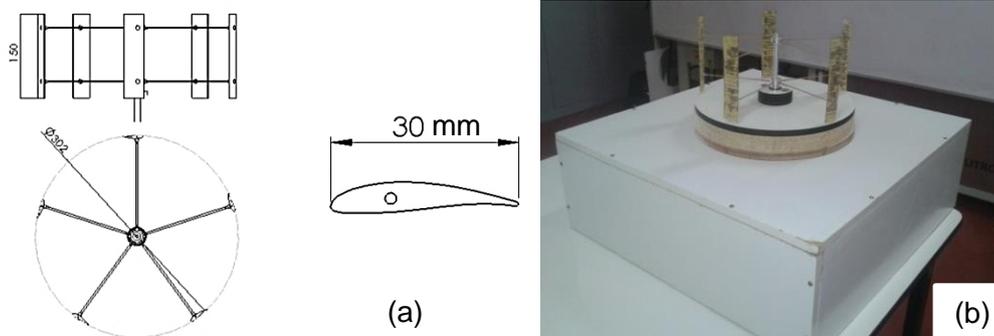


Figura 4.3 – (a) Projeto do rotor [Fonte: Fiabani, 2016] e (b) Foto da turbina.

Devido à limitação de espaço na seção do túnel aerodinâmico do LMF da UFRGS, que possui 1 m^2 de área transversal, a turbina desenvolvida por Fiabani, 2016, utilizou uma escala de 3:5 para todas as dimensões projetadas por Chong *et al.*, 2013, resultando em uma turbina com um diâmetro de 302 mm. O perfil aerodinâmico utilizado para as pás da turbina foi o perfil Wortmann FX-63-137, com uma dimensão de corda de 30 mm. As pás foram confeccionadas com chapas de MDF de 6 mm de espessura cortadas a laser e posteriormente coladas em camadas para a obtenção de pás com 150 mm de altura. O acabamento da superfície das pás foi realizado com a aplicação de uma camada de massa para madeira, finalizado com lixamento.

O eixo da turbina foi construído a partir de uma barra de alumínio de 25,4 mm de diâmetro, pelos processos de torneamento e furação. Hastes de fibra de vidro de 3 mm de diâmetro foram utilizadas para a fixação das pás ao eixo. O eixo é apoiado por dois mancais de rolamento à uma estrutura de madeira que tem por objetivo simular o efeito do topo de um edifício, Figura 4.3. As dimensões da estrutura são 632 mm de comprimento e largura, com 214 mm de altura.

4.4. Estator

Segundo Chong *et al.*, 2013, estator é um dispositivo projetado para superar as baixas velocidades do vento e condições desfavoráveis de turbulência em regiões urbanas. Isso ocorre porque o estator diminui o escoamento na zona de torque negativo da turbina de eixo vertical e acelera nas pás de avanço.

O estator utilizado nos experimentos do presente trabalho, Figura 4.4, foi construído por Fiabani, 2016, a partir de chapas de PVC. Foi projetado com base no estator proposto por Chong *et al.*, 2013, porém, com guias mais aerodinâmicas que possuem um perfil que busca o aumento da velocidade do fluido.

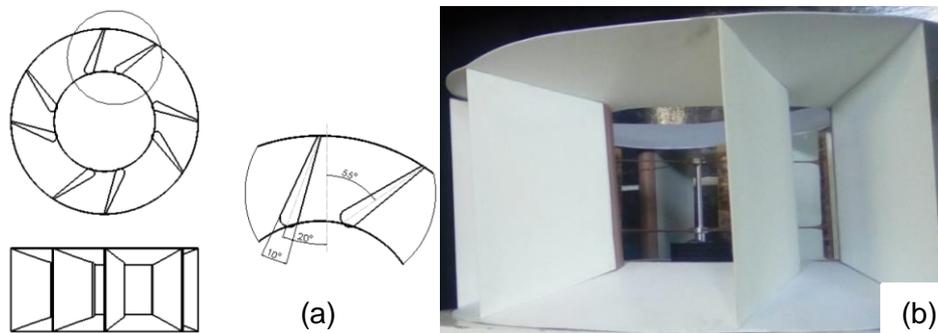


Figura 4.4 – Estator utilizado na turbina: (a) Desenho [Fonte: Fiabani, 2016] e (b) Fotografia do estator.

As dimensões do estator, assim como para a turbina, seguiram uma escala de 3:5, proposto por Chong *et al.*, 2013. Possui um diâmetro externo de 600 mm, diâmetro interno de 324 mm, altura da parte externa de 270 mm e altura da passagem de ar no anel interno de 160 mm.

O estator é posicionado sobre a estrutura de madeira que representa uma edificação urbana, envolvendo a turbina de modo a direcionar o vento incidente sobre as pás de avanço.

4.5. Sistema para Medição de Torque

De acordo com Borges *et al.*, 2015, a medição do torque de um eixo em rotação possui algumas dificuldades, devido ao movimento rotativo e à necessidade de alimentação e de entrada/saída de dados dos sistemas conectados ao eixo.

No presente trabalho, como existe a limitação das dimensões reduzidas do eixo, que possui apenas 4,4 mm de diâmetro dificultado a utilização de transdutores de

deslocamento, optou-se pelo método mais antigo e simples para a medição do torque de um eixo em rotação, chamado por Borges *et al.*, 2015, de método de medição por absorção.

Para a utilização da técnica de medição de torque por absorção no eixo da turbina em estudo, foi construído um sistema de barbante e polia ilustrado na Figura 4.4(a) para a aplicação de uma carga frenante ao eixo, semelhante ao utilizado por Bazzo, 1980, e Kothe, 2016. Uma das extremidades do barbante é vinculada a uma balança de tração digital para medição de força, e na outra é aplicada uma carga (peso) variável. A parte do barbante vinculado à balança é posicionada na horizontal e este então envolve o eixo da turbina, para que ao friccionar o eixo da máquina, um torque seja aplicado. O barbante passa então por uma polia e é direcionado para baixo, onde é aplicada a carga variável.

Nesse sistema, é realizado o registro da massa aplicada na extremidade do barbante e é mensurado o peso resultante na balança. A partir da análise das forças aplicadas no barbante com o auxílio de um diagrama de corpo livre, Figura 4.4(b), pode-se deduzir que a força efetivamente aplicada no eixo é dada por

$$F_{EIXO} = (m_{BALAN\cA} - m_{CARGA})g, \quad (4.1)$$

na qual F_{EIXO} é a força resultante aplicada no eixo [N], $m_{BALAN\cA}$ é a massa medida na balança de tração digital [kg], m_{CARGA} é a massa da carga variável aplicada no barbante [kg] e g é a aceleração da gravidade [9,807 m/s²].

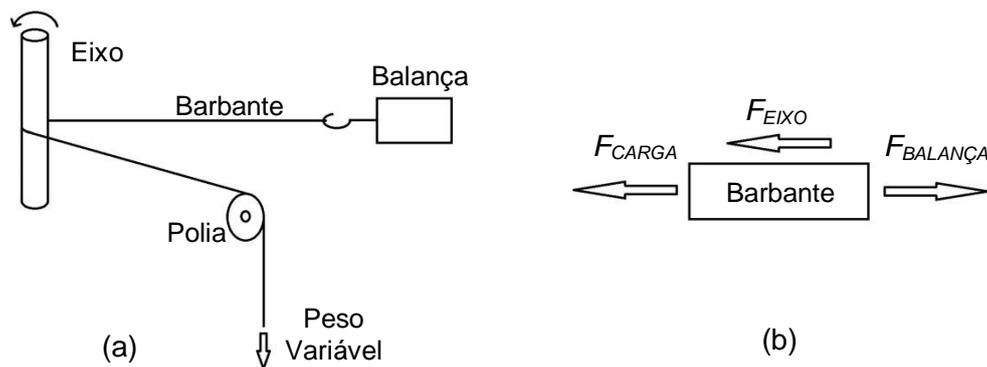


Figura 4.4 – (a) Desenho esquemático do sistema para medição de torque e (b) Diagrama de corpo livre das forças aplicadas no barbante.

Para a determinação do torque no eixo multiplica-se a força resultante no eixo pelo braço de alavanca, cujo valor é determinado pelo somatório do raio do eixo e do diâmetro do barbante

$$T_e = F_{EIXO}R_f, \quad (4.2)$$

na qual T_e é o torque no eixo [Nm] e R_f é o raio de aplicação da força em relação ao centro do eixo [m].

4.6. Levantamento das Curvas de Desempenho

Para o levantamento das curvas de torque e potência da turbina eólica, que caracterizam o desempenho da mesma, além das variáveis comentadas anteriormente, faz-se necessária a medição de diversas outras variáveis físicas no momento da experimentação.

Para a determinação da massa específica do ar, é necessária a mensuração da temperatura do ar e da pressão atmosférica. No presente trabalho, a pressão foi medida com

um barômetro de Torricelli e a temperatura com um termômetro a álcool. Com o conhecimento dessas grandezas, a massa específica, em kg/m^3 , é calculada por

$$\rho = \frac{p}{RT_{ar}}, \quad (4.3)$$

na qual p é a pressão [Pa], R é a constante do gás que vale 287,053 J/kgK para o ar e T_{ar} é a temperatura absoluta do ar [K].

Uma variável importante de ser mensurada é a velocidade do escoamento de ar que passa pelo túnel aerodinâmico. Neste trabalho, utilizou-se de um tubo de Pitot conectado a um transdutor de pressão, que então é ligado a um multímetro eletrônico onde se obtém a resposta em forma de corrente elétrica. Para o transdutor de pressão do LMF utilizado, a equação de calibração para a conversão do valor medido de corrente elétrica em pressão dinâmica é dada por

$$p = 25i - 100, \quad (4.4)$$

na qual i é a corrente elétrica, lida em mA.

Conhecido o valor da pressão dinâmica, o módulo da velocidade do escoamento de ar é determinado por

$$U = \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad (4.5)$$

Com todas as variáveis mensuradas, é realizado o cálculo da razão de velocidade de ponta de pá (Equação 3.4) e do torque (Equação 4.2), podendo-se realizar o cálculo da potência no eixo da turbina, dado por

$$P_e = T_e \omega, \quad (4.6)$$

na qual P_e é a potência no eixo.

Conhecidos os valores do torque e potência para cada condição de velocidade do escoamento e carga no eixo, podem ser calculados os respectivos coeficientes para o torque (Equação 3.6) e para a potência (Equação 3.3), e por fim plotadas as curvas de desempenho da turbina eólica.

4.7. Equipamentos Utilizados nas Medições

O sistema para a avaliação do torque aplicado no eixo da turbina foi montado no interior da estrutura de madeira que atua como base da turbina e que representa o topo de uma edificação urbana, de modo a proteger os instrumentos de possíveis perturbações causadas pelo escoamento de ar, e também para que não haja influência dos instrumentos no escoamento que chega à turbina. A montagem dos instrumentos relacionados com a medição da turbina segue o desenho esquemático apresentado na Figura 4.4, e constitui-se de uma balança de tração WeiHeng WH-A04 com resolução de 5 g para uma faixa de 10 g à 1 kg e um foto tacômetro digital, modelo MDT-2244B, com especificações apresentadas no Anexo A.

A avaliação da massa variável aplicada na extremidade livre do barbante foi realizada por uma balança digital convencional com resolução de 1 g para uma faixa de 5 g à 5 kg. Para a medição da corrente elétrica de saída do transdutor de pressão que indica a

pressão dinâmica do escoamento, foi utilizado um multímetro digital Minipa modelo ET-2652, com especificações descritas no Anexo B.

5. RESULTADOS

Nesta sessão são apresentados e discutidos os resultados obtidos após a experimentação da turbina eólica. Além das medições realizadas no momento dos experimentos com a turbina, algumas grandezas necessárias foram previamente mensuradas, e estão expostas na Tabela 5.1. Para redução da incerteza, todas as medidas realizadas neste trabalho foram repetidas três vezes. Uma discussão sobre a análise de incertezas de medição dos valores mensurados para o presente trabalho é apresentada no Apêndice A.

Tabela 5.1 – Medidas de grandezas importantes e suas incertezas.

Grandeza	Instrumento	Medida	Incerteza
Raio do rotor da turbina, R_r (m)	Paquímetro	0,1448	0,0032
Altura das pás, H_r	Paquímetro	0,1500	0,0026
Área da turbina, A (m ²)	-	0,0434	0,0010
Raio de aplicação da força, R_f (mm)	Paquímetro	3,2	0,1
Pressão ambiente, p_{atHg} (mmHg)	Barômetro de Torricelli	757	1
Pressão ambiente, p_a (kPa)	-	100,909	0,133
Temperatura do ar, T_{ar} (°C)	Termômetro a álcool	19	0,5

Para cada variação na frequência de alimentação do motor elétrico do ventilador do túnel aerodinâmico, foi realizada uma medida para a condição da turbina sem rotação, para a avaliação do torque estático, e 4 medidas com condições distintas de aplicação de carga no eixo, com a turbina em rotação, para avaliação do desempenho dinâmico da turbina em diferentes razões de velocidade de ponta de pá.

5.1. Torque Estático

A avaliação do torque estático foi realizado com uma variação da frequência de alimentação do motor elétrico do ventilador de 15 à 50 Hz, com incrementos de 5 Hz. Foram mensuradas a carga aplicada na extremidade livre do barbante, a carga resultante na balança de tração e a corrente elétrica de saída do transdutor de pressão. Para uma redução na incerteza da medição, foram realizadas três medidas para cada condição de velocidade do escoamento.

A Figura 5.1 ilustra a curva de torque estático e a Figura 5.2 o coeficiente de torque estático, ambas em função da velocidade do escoamento, para um intervalo de 0 a 9,1 m/s.

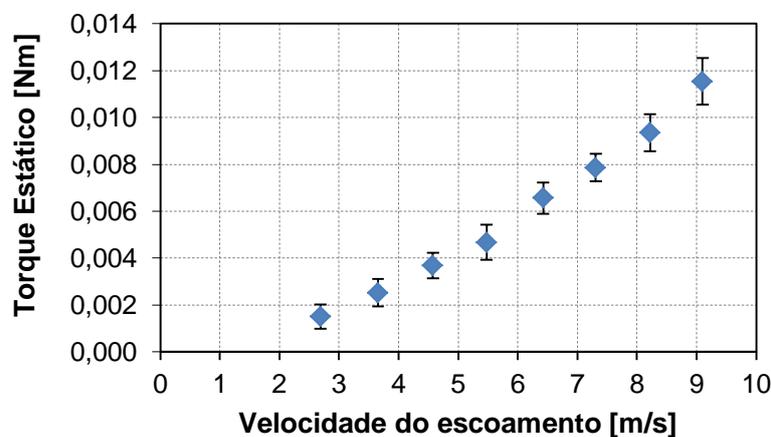


Figura 5.1 – Torque estático na turbina para diferentes velocidades do vento.

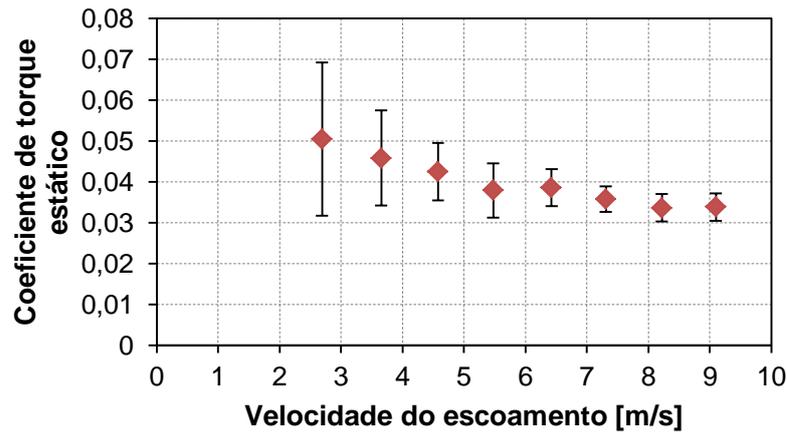


Figura 5.2 – Coeficiente de torque estático para diferentes velocidades do vento.

Como esperado, ocorre um aumento do torque estático aplicado na turbina com o aumento da velocidade do escoamento, devido ao aumento das forças de sustentação atuantes nas pás. O coeficiente de torque estático aparenta ter uma leve redução com o aumento da velocidade do escoamento. Porém, como a incerteza de medição é bastante elevada para baixas velocidades, devido ao fato de que nessa situação a massa utilizada para aplicação de torque é muito pequena, alcançando o limite da resolução da balança de tração, não é possível a obtenção de uma conclusão precisa sobre o comportamento do coeficiente de torque nesta condição.

5.2. Torque Dinâmico

Para a análise do comportamento dinâmico da turbina quando em operação, foram realizadas medições com uma variação da frequência de alimentação do motor do ventilador da mesma forma que para o caso estático, de 15 a 50 Hz com incrementos de 5 Hz. A velocidade do escoamento medida variou de 2,7 a 8,7 m/s neste caso. Assim como para o torque estático, foram mensuradas a carga aplicada na extremidade livre do barbante, a carga resultante na balança de tração e a corrente elétrica de saída do transdutor de pressão, e também a rotação da turbina.

A Figura 5.3 ilustra a variação do coeficiente de torque para diversas razões de velocidade de ponta de pá, com medições realizadas com várias cargas aplicadas ao eixo para diversas velocidades do escoamento.

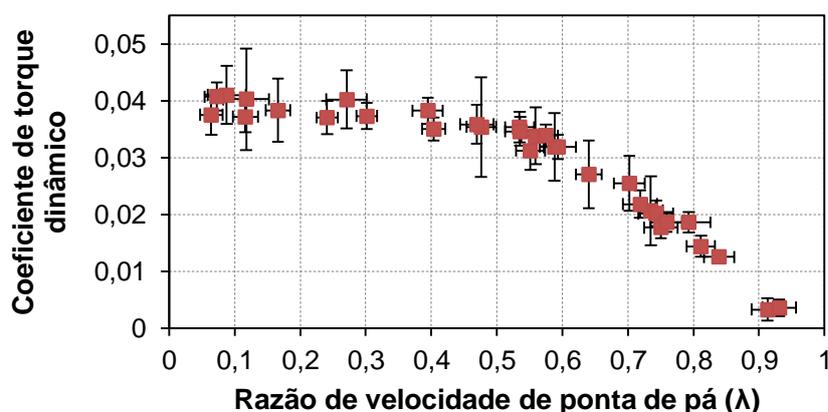


Figura 5.3 – Coeficiente de torque dinâmico para diversas razões de velocidade de ponta de pá.

O coeficiente de torque dinâmico diminui com o aumento da razão de velocidade de ponta de pá, ou seja, quando a rotação da turbina aumenta para uma determinada

velocidade do vento, o torque disponível no eixo da turbina é reduzido. Da mesma forma que para o torque estático, os pontos com incerteza de medição mais elevada ocorrem devido à limitação da resolução da balança de tração.

5.3. Potência

A análise da potência da turbina é realizada com os mesmos dados obtidos nas medições dinâmicas detalhadas na seção anterior. Primeiramente, é ilustrado na Figura 5.4 o coeficiente de potência da turbina em função da razão de velocidade de ponta de pá.

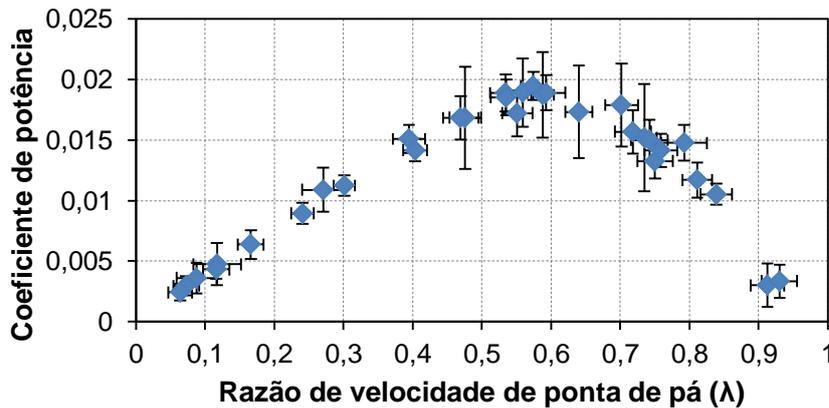


Figura 5.4 – Coeficiente de potência para diversas razões de velocidade de ponta de pá.

A forma da curva de coeficiente de potência é de um aumento até certo limite, onde ocorre um valor de coeficiente máximo para uma determinada razão de velocidade de ponta de pá, conhecida como λ ótimo, e para valores maiores dessa razão, o coeficiente de potência diminui, assim como é observado na literatura.

O coeficiente de potência máximo obtido experimentalmente para essa turbina ocorreu para uma razão de ponta de pá de aproximadamente 0,56. Como turbinas eólicas são projetadas para trabalharem na condição de máxima eficiência, a Figura 5.5 mostra a curva de potência da turbina obtida neste trabalho em função da velocidade do escoamento de ar para esta mesma razão de velocidade de ponta de pá de 0,56. Para comparação, é apresentado o resultado obtido por Fiabani, 2016.

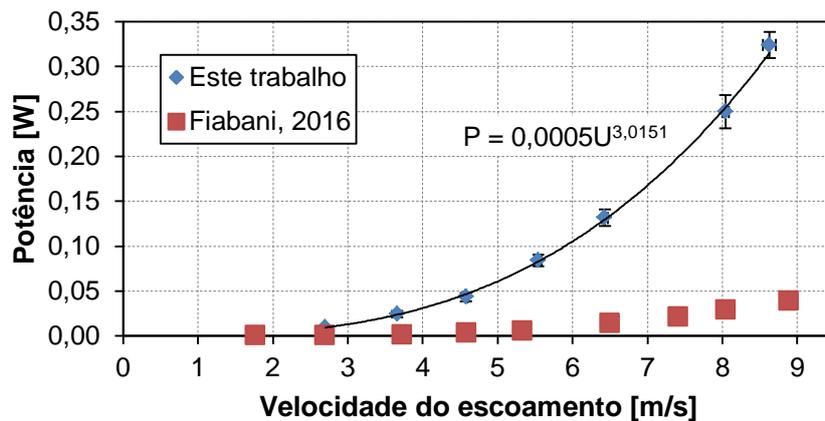


Figura 5.5 – Curvas de potência da turbina.

Os pontos da curva de potência da turbina obtidos experimentalmente tem um comportamento de um aumento elevado com a velocidade do vento, e como é possível observar no ajuste com uma curva de tendência de potência, a potência produzida pela turbina cresce aproximadamente com o cubo da velocidade do vento, respeitando a Equação 3.2. Em

uma comparação com os resultados obtidos por Fiabani, 2016, observa-se um aumento da potência convertida, com uma razão de aumento de 9,78 para uma velocidade do vento de 6,5 m/s. Isso pode estar relacionado com o fato da metodologia aplicada por Fiabani, 2016, utilizar um gerador elétrico construído naquele trabalho, que pode ser pouco eficiente na conversão da potência mecânica no eixo da turbina em potência elétrica, e também porque a razão de velocidade de ponta de pá pode ser diferente, visto que a turbina não possui controle de rotação.

A curva do coeficiente de potência se apresentou como o esperado pela literatura, apesar do ponto de máximo coeficiente corresponder a uma razão de velocidade de ponta de pá baixa para uma turbina Darrieus, com um valor de 0,56. Segundo Toja-silva, 2013, turbinas Darrieus com 2 pás possuem razão de velocidade de ponta de pá ótimo de aproximadamente 4, e uma TEEV Giromill de 4 pás instalada em uma edificação resultou uma razão de 1,3. A ocorrência disso está relacionada com o fato da turbina utilizada neste trabalho possuir mais pás do que uma turbina Darrieus convencional, dado que o aumento no número de pás de uma turbina eólica reduz a rotação e leva a um aumento do torque. Outro fator que pode estar relacionado é a turbulência gerada pela edificação, que influencia negativamente no desempenho da turbina, reduzindo sua rotação.

Os valores do coeficiente de potência encontrados foram baixos quando comparados a resultados esperados para uma turbina Darrieus convencional. O valor máximo encontrado foi de 0,019, abaixo do valor de 0,4 encontrado na literatura [Garcia *et al.*, 2006]. Isto se deve ao fato das metodologias aplicadas serem diferentes, e também devido à construção da turbina e do estator utilizados neste trabalho não seguirem o mesmo padrão de qualidade de turbinas comerciais.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado o levantamento das curvas de desempenho de uma TEEV Darrieus tipo H. A metodologia empregada apresentou-se eficaz para o levantamento das curvas que caracterizam o comportamento dinâmico da turbina. A curva de potência convertida para diferentes velocidades do escoamento apresentou um comportamento próximo com o esperado pela teoria, com a potência variando com o cubo da velocidade do vento.

Para a avaliação do torque estático, a metodologia empregada foi deficiente, com uma incerteza de medição bastante elevada para o coeficiente de torque estático a baixas velocidades do escoamento de ar, devido a dificuldade de mensuração da baixa força no barbante pela balança de tração. A obtenção da curva do torque estático em função da velocidade do vento foi mais eficiente neste caso, apresentando um comportamento de aumento com a velocidade, condizente com o esperado.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a medição de torque estático e dinâmico no eixo da turbina com a utilização de torquímetros comerciais, visto que agora se tem o conhecimento da ordem de grandeza destas variáveis, e comparação com os valores apresentados no presente trabalho. Sugere-se também a aplicação de cargas específicas no eixo da turbina, de modo que seja obtida uma curva de coeficiente de potência mais organizada, com pontos melhor distribuídos ao longo do eixo de razão de velocidade de ponta de pá. Por fim, sugere-se a realização de estudos sobre o efeito nos resultados da utilização de diferentes tipos de barbantes.

REFERÊNCIAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica, “**Boletim Anual De Geração Eólica 2016**”, 2017a.

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica, “**Energia Eólica – O Setor**”, <http://www.abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>. Acessado em 02/05/2017b.

Alé, J. A. V.; Petry M. R., Garcia, S. B., Simioni, G. C. S., Konzen, G., **“Performance Evaluation of the Next Generation of Small Vertical Axis Wind Turbine”**, PUCRS - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil, 2007.

Barlow, J. B.; Era, W. H., Pope, A., **“Low-Speed Wind Tunnel Testing”**, 3rd Edition, 1999.

Bazzo, W. A.; **“Desempenho de Rotores de Eixo Vertical Tipo Savonius”**, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1980.

Borges, J. C. S.; Nóbrega Sobrinho, C. A., Lima Filho, A. C., Belo, F. A., **“Métodos e técnicas de medição de torque diretamente em eixos rotativos”**, Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, Nº 28, p. 121-129, 2015.

Castro, R. M. G.; **“Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Eólica”**, 2003.

Chong, W. T.; Naghavi, M.S., Poh, S. C., Mahlia, T. M. I., Pan, K. C., **“Techno-economic analysis of a wind-solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application”**, Applied Energy, vol 88, 4067-4077p, 2011.

Chong, W.T.; Fazlizan, A., Poh, S. C., Pan, K. C., Hew, W. P., Hsiao, F. B., **“The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane”**, Renewable Energy, Vol. 112, p. 601-609, 2013.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, **“Energia Eólica Princípios e Tecnologias”**, 2008.

Fiabani, A.; **“Estudo de direcionadores de escoamento para turbinas eólicas de eixo vertical aplicadas em áreas urbanas”**, Relatório completo projeto de pesquisa PIBIC, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

Garcia, S. B.; Simioni, G. C. S., Alé, J. A. V., **“Aspectos de desenvolvimento de turbina eólica de eixo vertical”**, CONEM, IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife, Brasil, 2006.

Garré, S. O.; **“Avaliação Experimental do Desempenho Aerodinâmico de Pequenas Turbinas Eólicas Confeccionadas em Prototipagem 3D”**, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

Goldemberg, J.; Villanueva, L. P., **“Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento”**, São Paulo, Edusp, 2003.

Halliday, D.; Resnik, R., Walker, J., **“Fundamentos de Física”**, Volume 1, 8ª Edição, Rio de Janeiro, LTC, 2009.

Kline, S. J.; McClintock, F. A., **“Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments”** Mechanical Engineering, Vol. 75, No. 1, January 1953: 3-8.

Kothe, L. B.; **“Estudo Comparativo Experimental e Numérico Sobre o Desempenho de Turbinas Savonius Helicoidal e de Duplo-Estágio”**, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

Toja-silva, F.; Colmenar-santos, A., Castro-gil, M., **“Urban wind energy exploitation systems: behaviour under multidirectional flow conditions - opportunities and challenges”**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vo. 24, p. 364-378, 2013.

APÊNDICE A - ANÁLISE DE INCERTEZAS

A teoria de erros define o erro de uma medição como a diferença entre o valor verdadeiro da grandeza a ser medida e o valor medido. Como o valor verdadeiro da grandeza não é conhecido, o valor do erro não pode ser afirmado. São utilizadas técnicas para a estimação do valor do erro, através da chamada incerteza de medição, que indica quanto o valor medido pode diferir do valor verdadeiro, em termos de probabilidade.

Instrumentos de medição geralmente apresentam uma indicação de sua incerteza de medição. Além da incerteza do instrumento, outros erros podem ocorrer na realização de uma medição, como erros grosseiros ou erros sistemáticos, que devem ser investigados e minimizados. Existe também uma terceira classe de erros de difícil identificação, que possui um caráter aleatório. Porém, uma análise estatística das medições pode ser realizada para a estimação da incerteza de medição.

Quando é realizada a determinação de uma grandeza a partir do conhecimento de outras determinadas experimentalmente, pode-se estimar sua incerteza através do procedimento de Propagação da Incerteza de Medição. Neste procedimento, é realizada a estimativa da propagação do desvio padrão de uma grandeza R a partir do desvio padrão de suas variáveis dependentes X_i para i variando de 1 a n . Segundo Kline e McClintock, 1953, a incerteza propagada δR de um resultado pode ser calculada por

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{A.1})$$

na qual δR é a incerteza do resultado, R é a equação que define a grandeza, X_i são as variáveis dependentes e δX_i é a incerteza da variável X_i .

No presente trabalho, foram utilizados instrumentos com incertezas informadas em manuais, como o foto tacômetro e o multímetro, e instrumentos que não informaram suas incertezas. Nestes casos, foi utilizada a menor escala possível de ser medida como valor da incerteza do instrumento. A Tabela A.1 lista as incertezas dos instrumentos utilizados neste trabalho.

Tabela A.1 – Incerteza dos instrumentos utilizados.

Instrumento	Incerteza
Foto Tacômetro	$\pm (0.05\%+1D)$
Multímetro	$\pm (0.8\%+6D)$
Paquímetro	0,1 mm
Balança de tração	5 g
Balança digital	1 g
Termômetro	0,5 °C
Barômetro	1 mmHg

Para uma melhor estimativa do erro de uma medição, pode ser utilizada uma análise estatística de várias medições da mesma grandeza. Para amostras pequenas, a análise é realizada com o desvio padrão amostral

$$s = \left(\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{A.2})$$

na qual s é o desvio padrão amostral, x_i são os valores da amostra, \bar{x} é a média dos valores da amostra e n é o número total de eventos da amostra.

A incerteza para amostras pequenas é calculada utilizando-se a distribuição de probabilidade t de Student

$$w_{\bar{x}} = \frac{ts}{\sqrt{n}}, \quad (\text{A.3})$$

na qual $w_{\bar{x}}$ é a incerteza da média, t é o valor da distribuição para uma dada confiabilidade e um número de graus de liberdade ν .

Neste trabalho, foram realizadas três medições para cada grandeza, que para um nível de confiabilidade de 95,45 %, resulta em uma distribuição com t de 4,53.

ANEXO A – FOTO TACÔMETRO DIGITAL MINIPA MDT-2244B

O manual de instruções pode ser acessado em:

< www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/MDT-2244B-1301-BR.pdf >

Características Gerais:

- Display: 5 dígitos, 100000 Contagens
- Taxa de Amostragem: 0.5 segundo (acima 120RPM)
- Seleção de Faixa: Automática
- Distância de Detecção (Photo): 50mm ~ 250mm
- Base de Tempo: Cristal de Quartzo
- Ambiente de Operação: 0°C ~ 50°C, RH < 80%

A precisão é dada como \pm (% da leitura + número de dígitos menos significativo) para 23°C \pm 5°C e umidade relativa até 80%. Ciclo de calibração recomendado de 1 ano.

Especificações de Medição:

Faixa: 2.5 ~ 99999 RPM

- Precisão: \pm (0.05%+1D)
- Resolução: 0.1 RPM (2.5 ~ 999.9 RPM)
1 RPM (\geq 1000 RPM)

ANEXO B – MULTÍMETRO DIGITAL MINIPA ET- 2652

O manual de instruções pode ser acessado em:

< [www.eletronics.com/ uploads/ProdutoDownload/produto_473.pdf](http://www.eletronics.com/uploads/ProdutoDownload/produto_473.pdf)>

Características Gerais:

- Display: 4 ½ Dígitos, 20000 Contagens (com iluminação).
- Taxa de Amostragem: Aprox. 3 vezes/segundo.
- Indicação de Polaridade: Positiva implícita e negativa “-”.
- Mudança de Faixa: Manual.
- Ambiente de Operação: 0°C ~ 40°C (32°F ~ 104°F), RH<80%.
- Altitude de Operação: 2000m.
- Grau de Poluição: 2.
- Alimentação: 1 x 9V (NEDA 1604, 6F722 ou 006P).
- Consumo: Aprox. 4mA (típico).

A precisão é específica como $\pm(\% \text{ leitura} + \text{número de dígitos})$ para temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e umidade

relativa < 75%. A especificação é válida para 5% a 100% da faixa de medida. Ciclo de calibração recomendado de 1 ano.

Especificações de Medição de Corrente DC:

- Faixas: 200 μA , 2mA, 20mA, 200mA, 20A.
- Precisão: 200 μA ~ 20mA $\pm (0.5\%+4D)$.
200mA $\pm (0.8\%+6D)$.
20A $\pm (2.0\%+15D)$.
- Resolução: 0.01 μA , 0.1 μA , 1 μA , 10 μA , 1mA.
- Queda de Tensão: Máximo 200mV.