

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIÇÃO DAS CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA MECÂNICA EM UMA TURBINA  
EÓLICA DE EIXO VERTICAL UTILIZANDO UM FREIO DE PRONY

por

Giovani Minuzzi

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, janeiro de 2025

## CIP - Catalogação na Publicação

MINUZZI, GIOVANI  
MEDIÇÃO DAS CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA MECÂNICA EM  
UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL UTILIZANDO UM  
FREIO DE PRONY / GIOVANI MINUZZI. -- 2025.  
27 f.  
Orientador: ALEXANDRE VAGTINSKI DE PAULA.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2025.

1. TURBINA. 2. TORQUE. 3. POTÊNCIA MECÂNICA. 4.  
ROTAÇÃO. 5. FREIO DE PRONY. I. DE PAULA, ALEXANDRE  
VAGTINSKI, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Giovani Minuzzi

MEDIÇÃO DAS CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA MECÂNICA EM UMA TURBINA  
EÓLICA DE EIXO VERTICAL UTILIZANDO UM FREIO DE PRONY

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  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry

Prof. Dr. Diogo Elias da Vinha Andrade

Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot

Porto Alegre, janeiro de 2025

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo o apoio ao longo da graduação.

Ao orientador Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula pelos ensinamentos e todo o suporte, pois sua ajuda foi de suma importância para a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos por disponibilizarem o espaço e os aparelhos para poder realizar os experimentos.

Minuzzi, Giovanni. **Medição das curvas de torque e potência mecânica em uma turbina eólica de eixo vertical utilizando um freio de Prony**. 2025. 27 p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental do desempenho de uma turbina eólica de eixo vertical montada sobre uma estrutura que busca simular o efeito do topo de uma edificação. Envolvendo o rotor da turbina há um estator, um dispositivo que procura direcionar o escoamento para as pás da turbina, melhorando o desempenho de partida. O objetivo do trabalho é o levantamento das curvas de torque e potência mecânica de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo H-Darrieus de cinco pás variando a velocidade de rotação através de um freio de Prony. O experimento realizou-se no túnel aerodinâmico Professor Debi Pada Sadhu do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS através da variação da velocidade do escoamento. Para as diferentes velocidades no vento procurou-se freiar a turbina para a medição do torque e, posteriormente, determinar a potência de frenagem. As curvas obtidas estão de acordo com o que é encontrado na literatura. O torque máximo obtido foi de 166 mNm para uma rotação de 102 RPM e a potência máxima foi de 6519 mW para 433 RPM.

**PALAVRAS-CHAVE:** turbina, torque, potência mecânica, rotação, freio de Prony

Minuzzi, Giovanni. **Measurement of torque and mechanical power curves in a vertical axis wind turbine using a Prony brake.** 2025. 27 p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.

## ABSTRACT

This paper presents an experimental study of the performance of a vertical axis wind turbine mounted on a structure that seeks to simulate the effect of the top of a building. Surrounding the turbine rotor is a stator, a device that seeks to direct the flow to the turbine blades, improving starting performance. The objective of the work is to survey the torque and mechanical power curves of a five-blade H-Darrieus vertical axis wind turbine by varying the rotation speed through a Prony brake. The experiment was carried out in the Professor Debi Pada Sadhu wind tunnel of the Fluid Mechanics Laboratory of UFRGS by varying the flow speed. For the different wind speeds, the turbine was braked to measure the torque and, subsequently, determine the braking power. The curves obtained are in agreement with what is found in the literature. The maximum torque found was 166 mNm for a rotation of 102 RPM and the maximum power was 6519 mW for 433 RPM.

**KEYWORDS:** turbine, torque, mechanical power, rotation, Prony brake

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$d$	Diâmetro do barbante	[m]
$F$	Força	[N]
$f$	Frequência lida no inversor	[Hz]
$g$	Aceleração da gravidade	[m s <sup>-2</sup> ]
$i$	Corrente elétrica	[mA]
$m_{CARGA}$	Massa lida na célula de carga 1	[kg]
$m_{BALANÇA}$	Massa lida na célula de carga 2	[kg]
$\Delta m$	Diferença entre as massas lidas das células de carga	[kg]
$n_{RPM}$	Velocidade de rotação	[RPM]
$P$	Potência	[mW]
$p_{atm}$	Pressão atmosférica	[Pa]
$p_{din}$	Pressão dinâmica	[Pa]
$R$	Constante universal dos gases perfeitos	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$r_{EIXO}$	Raio do eixo do rotor	[m]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	[K]
$T$	Torque	[mN m]
$u_{\infty}$	Velocidade de escoamento não perturbado	[m s <sup>-1</sup> ]

### Símbolos gregos

$\rho$	Massa específica do ar	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\omega$	Velocidade angular	[rad s <sup>-1</sup> ]

### Abreviaturas e acrônimos

LMF	Laboratório de Mecânica dos Fluidos
TEEH	Turbina eólica de eixo horizontal
TEEV	Turbina eólica de eixo vertical

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	1
1.1.1. Objetivo Geral.....	1
1.1.2. Objetivos Específicos .....	1
1.2. Revisão Bibliográfica.....	2
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>3</b>
2.1. Turbinas Eólicas de Eixo Vertical .....	3
2.2. Turbinas de Sustentação .....	3
2.3. Estator.....	3
2.4. Freio de Prony.....	4
2.5. Curvas de Torque e Potência .....	4
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>6</b>
3.1. Túnel Aerodinâmico.....	6
3.2. Turbina Eólica de Eixo Vertical .....	6
3.3. Instrumentação.....	8
3.4. Procedimento Experimental.....	8
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>13</b>
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	14
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>14</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>16</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Há uma busca pela transição energética ocorrendo pelo mundo. A troca de fontes poluentes de energia, como a queima de petróleo, por fontes de produção de energia que não agridem o meio ambiente vem sendo feita. Existem várias opções para se cumprir esta tarefa, como as produções de energia eólica, sendo que há diversos parques eólicos pelo mundo. Porém os parques eólicos costumam ser encontrados mais afastados dos locais de consumo, ocasionando perdas de energia e, geralmente, necessitam de grandes investimentos. E uma opção pouco explorada seria a produção de energia elétrica através do aproveitamento do escoamento dos ventos em grandes centros urbanos, reduzindo a perda de energia, pois o local de produção de energia seria o mesmo do local de consumo (TOJA-SILVA *et al.*, 2013).

As turbinas para a produção de energia eólica geralmente são divididas em dois tipos: turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) e as turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV). Na situação de ventos turbulentos, que são encontrados em grandes centros urbanos, as TEEVs se mostram mais eficientes para produção de energia, como mostram estudos de Mertens (2002), e Toja-Silva *et al.* (2013), mostram que para condições de ventos multidirecionais em ambientes urbanos as TEEVs apresentam um desempenho superior.

Com o intuito de melhorar a eficiência das TEEVs, Chong *et al.* (2013) desenvolveram um dispositivo que tem por objetivo direcionar o vento captado para as pás de avanço da turbina o que, comprovadamente, melhora o comportamento de auto partida e minimiza a zona de torque negativo da turbina. Dando continuidade aos trabalhos de Chong *et al.* (2013) um bolsista da UFRGS, Fiabani (2016) recriou a turbina em escala reduzida e realizou testes para uma outra configuração de direcionador, obtendo resultados positivos. Mais tarde, Oliveira (2017) procurou obter o levantamento das curvas de torque e potência, mas encontrou dificuldades, obteve poucos dados e resultados com incerteza considerável. Este trabalho dá continuidade ao trabalho de Oliveira (2017) e procura obter resultados com maior quantidade de dados para o conhecimento do comportamento da turbina.

### 1.1. Objetivos

#### 1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho visa aplicar uma metodologia experimental para que se tenha o conhecimento das curvas de torque e potência de uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV). Este experimento servirá de base para possíveis trabalhos futuros com análise numérica para saber qual a melhor configuração do estator para o desempenho máximo da turbina.

#### 1.1.2. Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Acoplamento de um sistema de acionamento de freio ao eixo da turbina eólica de eixo vertical (TEEV) já existente para a variação da velocidade de rotação da turbina, de um sensor de rotação para a medição da velocidade de rotação e de duas células de carga para obtenção dos dados;
- Desenvolvimento de uma metodologia de automação das medições para a obtenção dos dados;
- Obtenção dos dados através do processo de frenagem do eixo e, posteriormente, o levantamento das curvas de torque e potência da turbina em relação a velocidade de rotação.

## 1.2. Revisão Bibliográfica

Aqui neste capítulo são mostrados em ordem cronológica trabalhos da área de turbinas eólicas onde realizaram-se estudos sobre dispositivos estatores para o direcionamento de escoamento de ar e apresentaram levantamentos de curvas de torque e potência mecânica.

Chong *et al.* (2013) projetaram e investigaram a utilização de direcionadores de escoamento multidirecionais, destinados a captar a energia mecânica do vento proveniente de várias direções. O estudo foi realizado com uma turbina eólica do tipo Darrieus, modelo H, equipada com 5 pás retas, com dimensões de 0,5 m de diâmetro e 0,24 m de altura. O direcionador de escoamento foi projetado com o dobro do tamanho da turbina e contava com quatro pares de lâminas fixas.

Os resultados obtidos indicaram que o sistema proposto aumenta a velocidade do vento antes de atingir a turbina, alterando o ângulo de ataque do escoamento em relação às pás. Esse efeito contribui significativamente para uma melhoria no comportamento de partida da turbina. Os testes demonstraram que o direcionador de escoamento desenvolvido tem um impacto positivo no desempenho geral da turbina, o que pode ser uma solução para o desafio da geração de eletricidade em baixas velocidades de vento. Em outras palavras, o sistema permite que as turbinas comecem a gerar energia com uma velocidade do vento inferior àquela normalmente exigida para a operação das turbinas convencionais.

Fiabani (2016) projetou e testou uma turbina eólica do tipo H-Darrieus de cinco pás no túnel aerodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS. O desempenho da turbina foi comparado com o desenvolvido por Chong *et al.* (2013) e com um novo estator, que apresentava guias modificadas, com o objetivo de otimizar o desempenho da turbina. Devido às limitações de tamanho do túnel aerodinâmico, tanto a turbina quanto o estator foram fabricados em escala reduzida. Além disso, foi desenvolvido um gerador elétrico composto por 8 ímãs permanentes de neodímio e 8 bobinas de fio de cobre esmaltado. O gerador foi acoplado à turbina e, com uma carga resistiva aplicada, o sistema foi submetido ao escoamento de ar no túnel aerodinâmico. As curvas de potência e coeficiente de potência do sistema foram obtidas a partir da medição da rotação da turbina, utilizando um tacômetro digital, e da tensão e corrente no gerador, com multímetros digitais. Para uma velocidade do escoamento de ar de cerca de 8 m/s, o novo estator desenvolvido apresentou um aumento de 45% na potência convertida, em comparação com o estator proposto por Chong *et al.* (2013).

Oliveira (2017) buscou aplicar uma metodologia simples para a determinação das curvas de desempenho da turbina desenvolvida por Fiabani (2016) de modo que obteve o levantamento das curvas de torque e potência da turbina. O resultado estava de acordo com o encontrado na literatura, mas obteve poucos pontos para o levantamento das curvas e os resultados se mostraram com altos índices de incerteza.

Aboelezz *et al.* (2022) realizaram um estudo computacional e experimental onde os resultados mostraram que o uso de um direcionador aumentou em 26% a potência máxima extraída de uma TEEV se comparada sem o direcionador. No experimento foi utilizada uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus de três pás com o perfil NACA 0018. A turbina possuía um metro de altura e um metro de diâmetro. As pás possuíam 0,5 m de altura. Para as medições foram utilizados: torquímetro, disco de freio e um gerador. O experimento variou a posição das pás guias em relação às pás do rotor e o ângulo das pás guias.

Este trabalho procura dar continuidade aos anteriores, com a implementação de um sistema mais confiável da frenagem do eixo da turbina, possibilitando obter valores mais precisos das curvas de torque e potência mecânica.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são mostrados os principais assuntos que envolvem o estudo de turbinas eólicas de eixo vertical para uma melhor compreensão do experimento.

### 2.1. Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

A turbina eólica de eixo vertical (TEEV) rotaciona seu eixo na orientação vertical, perpendicularmente ao escoamento do vento. Existem diferentes modelos de TEEVs, sendo que neste trabalho será utilizada uma turbina do tipo H-Darrieus. As TEEVs são caracterizadas por possuírem baixo torque de partida, baixo custo de construção, design simples e podem funcionar mesmo com o escoamento sendo turbulento, sendo as mais indicadas para o uso urbano e em pequena escala (MERTENS, 2002).

Se comparadas às turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), tem a vantagem de converter a energia do vento de qualquer direção, sendo de construção menos complexa e tendo maior facilidade na instalação e manutenção. Porém, as TEEHs são amplamente mais utilizadas para produção de energia eólica por possuírem maior eficiência e rendimento (CUSTÓDIO, 2013).

### 2.2. Turbinas de Sustentação

As turbinas de sustentação são aquelas cujas pás possuem perfis similares aos perfis aerodinâmicos, como asas de aviões. Nestas turbinas, o vento incide na pá com um certo ângulo, produzindo forças aerodinâmicas. Estas forças podem ser decompostas em força de sustentação, responsável pela sustentação aerodinâmica da pá, agindo perpendicularmente ao escoamento, e força de arrasto, provocada pela pressão do vento sobre a superfície da pá, agindo na direção paralela ao escoamento, em sentido contrário à velocidade do vento. Esta força de sustentação é responsável por produzir um torque no eixo da turbina e, conseqüentemente, potência mecânica (GASCH E TWELE, 2012).

### 2.3. Estator

O estator ou direcionador é um dispositivo que aumenta a eficiência de uma turbina eólica de eixo vertical. O escoamento é direcionado para o rotor da turbina reduzindo a velocidade mínima do escoamento para a partida da turbina. A Figura 1 mostra o projeto do estator criado e construído com redução de escala por Fiabani (2016).

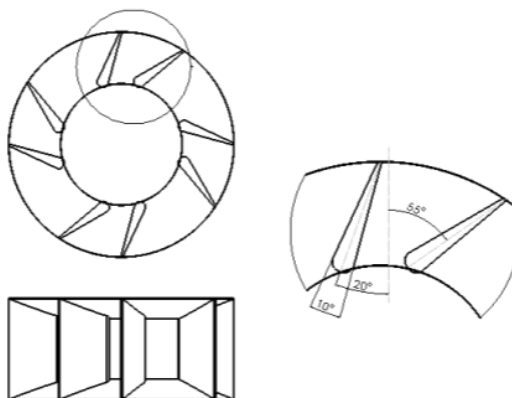


Figura 1 – Projeto do direcionador ou estator da turbina. Fonte: Fiabani (2016).

## 2.4. Freio de Prony

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. Um freio de Prony é um dispositivo utilizado para medir o torque e a potência de máquinas rotativas, como motores ou geradores. Ele é comum em experimentos de laboratório para testar o desempenho de motores de combustão interna, motores elétricos e outros sistemas de transmissão de potência (BAPTISTA, 2010).

O funcionamento básico do freio de Prony envolve o uso de um braço de alavanca montado em uma máquina rotativa. O braço é fixado a um tambor ou disco giratório que é impulsionado pela máquina em teste. Na extremidade do braço, é colocado um sistema de resistência, como uma carga de fricção, e a força de frenagem é aplicada ao movimento de rotação da máquina. A resistência gerada pela fricção no freio provoca um torque, e a rotação da máquina é desacelerada. O torque é calculado com base na força de frenagem aplicada e na distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação da máquina. A potência gerada pela máquina é determinada pelo produto do torque e da velocidade angular (rotação) da máquina. Esse tipo de medição é útil para determinar o desempenho de uma máquina em termos de eficiência, capacidade de gerar energia ou até mesmo para calcular o consumo de energia de um motor. A Figura 2 mostra um ensaio de um motor utilizando um freio de Prony.

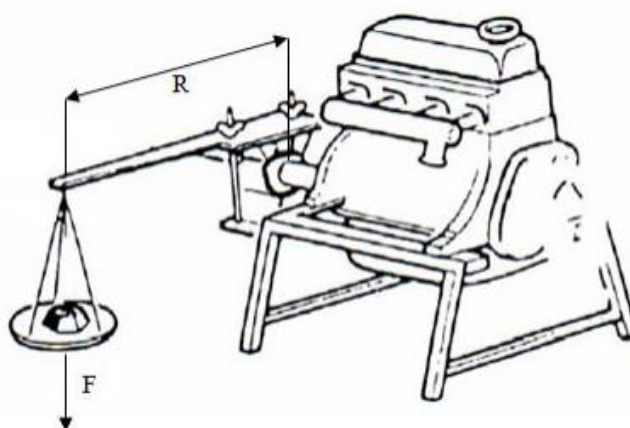


Figura 2 – Esquema de ensaio de motor utilizando um freio de Prony. Fonte: Baptista (2010).

## 2.5. Curvas de Torque e Potência

As curvas características de torque e potência encontradas na literatura mostram comportamentos semelhantes entre si. As Figuras 3 e 4 mostram que os valores de torque e potência em relação à rotação aumentam conforme o aumento da rotação, apresentam um máximo e conforme a rotação aumenta ainda mais apresentam um decaimento. A diferença é que o pico da curva de torque se mostra com valores de rotações mais baixos. A Figura 3 mostra a variação do torque em relação à rotação de uma turbina eólica em regime permanente.

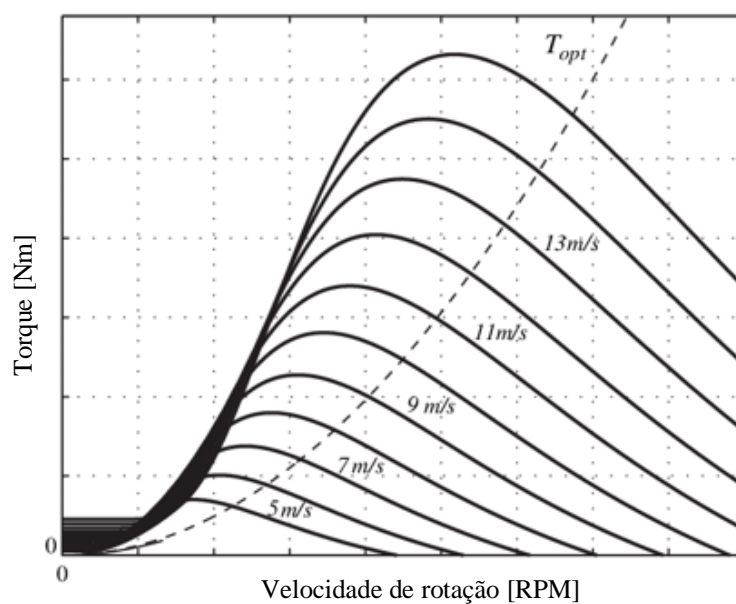


Figura 3 – Curva de Torque em função da rotação de uma turbina com controle de passo encontrada na literatura. Adaptado de Barros *et al.* (2013).

A Figura 4 mostra a variação da potência em relação à rotação.

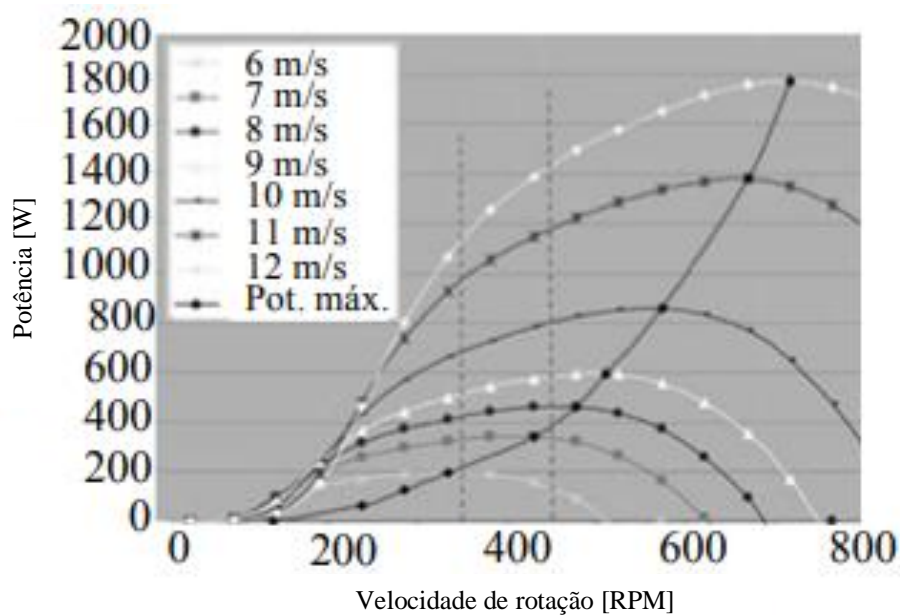


Figura 4 – Curva de potência em função da rotação de uma turbina Darrieus esperada como resultado do experimento. Adaptado de Toja-Silva *et al.* (2013).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Túnel Aerodinâmico

O equipamento utilizado para ensaio do modelo em escala reduzida foi o túnel aerodinâmico de circuito aberto Professor Debi Pada Sadhu do LMF da UFRGS. Ele possui uma seção de testes de 1 m de largura, 1 m de altura e comprimento total de 6,25 m, sendo que o comprimento destinado aos experimentos é de 1,2 m. O túnel aerodinâmico é equipado com um motor elétrico de 11 kW de potência, um ventilador axial de 12 pás desempenhando uma velocidade máxima de escoamento de 10 m/s. Na Figura 5 é mostrado o túnel aerodinâmico.



Figura 5 – Túnel Aerodinâmico Professor Debi Pada Sadhu. Fonte: Kothe (2016).

#### 3.2. Turbina Eólica de Eixo Vertical

O projeto da turbina eólica de eixo vertical foi dividido em três partes, sendo elas o rotor, o prédio e o direcionador, sendo que este último é um tipo de estator. Todo o sistema foi construído por Fiabani (2016), em escala reduzida de 3:5 devido ao tamanho do túnel aerodinâmico não comportar um modelo em escala natural. A turbina do tipo H-Darrieus possui cinco pás com um perfil Wortmann FX 63-137 com corda de 30 mm de comprimento. O raio e a altura do rotor possuem 150 mm. As pás foram confeccionadas de madeira MDF, as hastes foram fabricadas com fibra de vidro e o eixo de 260 mm de comprimento foi feito de alumínio por possuir boa resistência mecânica e ser leve. As dimensões do rotor da turbina são vistas na Figura 6.

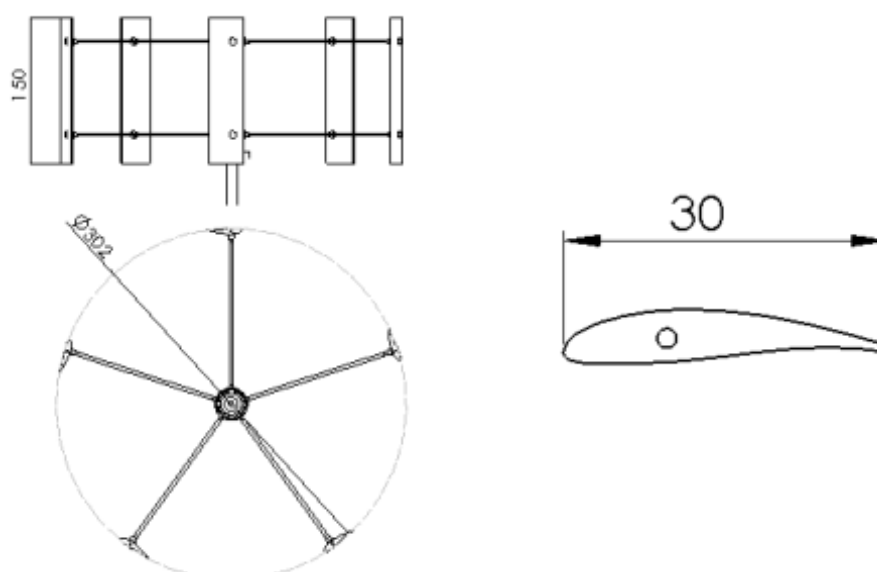


Figura 6 – Dimensões do rotor da turbina em mm. Fonte: Fiabani (2016).

A confecção do prédio consistiu na montagem de uma estrutura de madeira com um furo no meio para o posicionamento do rotor da turbina eólica. Na Figura 7 é mostrado o caixote simulando o topo de um prédio com o rotor da turbina posicionado acima. O direcionador de 600 mm de diâmetro externo, 324 mm de diâmetro interno, uma altura de 270 mm, possuindo uma altura da abertura de 160 mm utilizado no experimento foi mostrado na Figura 1.



Figura 7 – Rotor da turbina montado sobre uma caixa simulando o topo de uma edificação para a realização dos experimentos. Fonte: Fiabani, 2016.

### 3.3. Instrumentação

Para a obtenção dos resultados, foram utilizados instrumentos de medição e aparelhos essenciais para a realização do experimento mostrados na Tabela 1, que exhibe o modelo do instrumento, sua faixa de leitura, resolução e incerteza associadas. Mais detalhes sobre incertezas são encontrados no Apêndice.

Tabela 1 – Equipamentos e sensores utilizados para a realização dos experimentos e obtenção dos dados.

Instrumento	Modelo	Faixa de leitura	Resolução	Incerteza
Célula de carga	Com módulo conversor amplificador HX711	Até 1 kg	0,1 g	$\pm 5$ g
Multímetro digital	MINIPA ET-2652	20 mA	0,01 mA	$\pm (0,6\% + 4D)$
Sensor de rotação	LM393	Até 50.000 RPM	0,1 RPM	$\pm 5$ RPM
Paquímetro digital	PROLLENCE	150 mm	0,1 mm	$\pm 0,2$ mm

### 3.4. Procedimento Experimental

Para o funcionamento do túnel aerodinâmico com diferentes velocidades de escoamento é necessária a utilização de um inversor de frequência. O inversor de frequência utilizado varia a frequência entregue ao motor elétrico do túnel aerodinâmico, fazendo com que o conjunto altere sua rotação nominal. No experimento foram realizadas medições com as frequências de 30 a 60 Hz com incrementos de 10 Hz. Para valores de frequência abaixo de 30 Hz não foram realizados testes, pois a turbina eólica experimentada girava a baixas rotações e para freá-la era necessário aplicar uma força muito reduzida ao eixo da turbina, o que implicaria em resultados insignificantes.

Para cada frequência do inversor foi medida a velocidade do escoamento dentro do túnel aerodinâmico, que depende da massa específica do ar no dia de realização do experimento e da pressão dinâmica, medida através de um tubo de Pitot. A pressão dinâmica é medida através do valor lido no multímetro digital conectado a um transdutor de pressão e este conectado ao tubo de Pitot. A Figura 8 mostra o esquema montado para realização dos experimentos para a parte externa do túnel aerodinâmico.

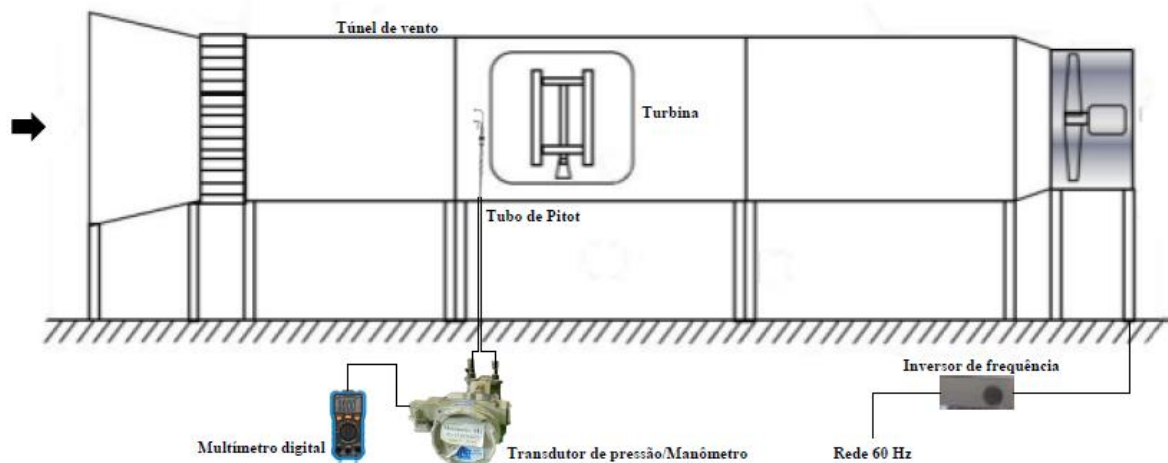


Figura 8 – Esquema do experimento para obtenção dos dados do escoamento. Adaptado de Fiabani (2016).



Para a obtenção da velocidade de rotação da turbina foi utilizado um sensor de rotação acoplado à estrutura que simula o topo de um prédio. Para diferentes velocidades de escoamento, a turbina gira a diferentes velocidades de rotação.

Para a obtenção das curvas é preciso realizar a desaceleração da turbina, assim, medindo a força da frenagem. A força é medida através do produto da diferença das massas lidas nas células de carga pela aceleração da gravidade, considerando-se o valor de  $g$  de  $9,806 \text{ m/s}^2$ . Os valores das massas são obtidos das leituras de sinais por intermédio de uma plataforma baseada em Arduino.

Para desacelerar a turbina foi utilizado um manete de freio de bicicleta. Com a utilização do manete, a turbina desacelera com o deslocamento de uma célula de carga, acoplada no mecanismo de freio do eixo da turbina, ocasionando o tensionamento de um barbante envolvendo o eixo da turbina. O esquema de acionamento do freio do eixo da turbina junto com a instrumentação necessária para obter os dados pode ser visto na Figura 9. As células de carga e o sensor de rotação foram conectados ao Arduino para a obtenção dos dados e, após, os dados eram repassados ao computador para a análise dos dados.

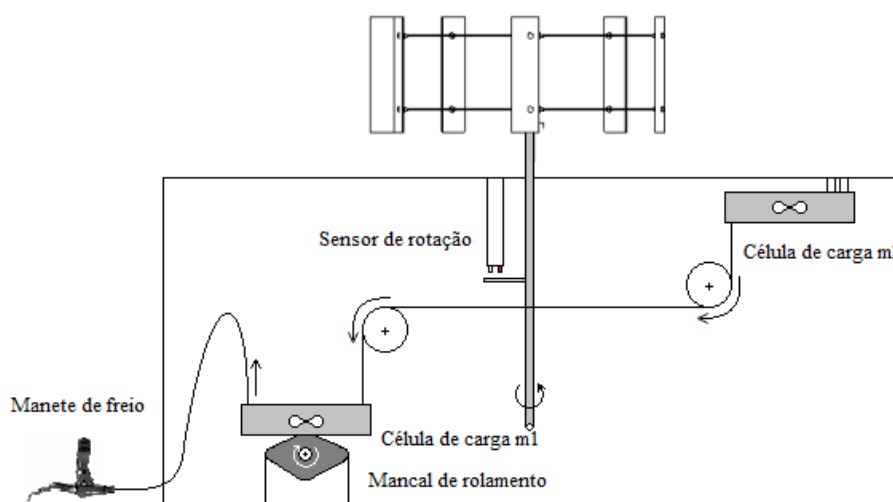


Figura 9 – Esquema montado para a frenagem da turbina e obtenção de dados do experimento.

Na Figura 10 é possível ver o diagrama de corpo livre das forças atuantes no barbante que frenava o eixo da turbina eólica.



Figura 10 – Diagrama de corpo livre das forças aplicadas no barbante.

Neste sistema, a força no eixo é a força resultante. O barbante está conectado nas duas células de carga. O barbante é tracionado pelo deslocamento da célula de carga  $m1$  na Figura 9. A célula de carga  $m1$  sofre uma leve rotação em torno do eixo do mancal de rolamento para tensionar o barbante e frear a turbina eólica. Quando nenhuma força é aplicada, a leitura nas

duas células de carga é zero. Quando é aplicada uma força para frear a turbina, a força no eixo é a diferença entre as duas forças opostas no barbante.

A força de frenagem aplicada à turbina eólica é dada por:

$$F = \Delta m g \quad (1)$$

em que  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\Delta m$  a diferença entre a massa medida pela balança e a massa da carga em kg, na forma:

$$\Delta m = m_{BALAN\c{C}A} - m_{CARGA} \quad (2)$$

sendo que  $m_{BALAN\c{C}A}$  na Figura 9 é representada pela leitura na célula de carga  $m_1$  e  $m_{CARGA}$  é representada pela leitura na célula de carga  $m_2$ .

O torque pode ser determinado com o produto da força de frenagem no eixo da turbina durante a desaceleração e da distância de onde esta força é aplicada, ou seja, do braço de alavanca correspondente, na forma:

$$T = Fr \quad (3)$$

o braço de alavanca é a soma do raio do eixo da turbina de 5,5 mm e do diâmetro do barbante de 0,8 mm, na forma:

$$T = F(r_{EIXO} + d) \quad (4)$$

a potência é dada pelo produto entre o torque e a velocidade de rotação do eixo da turbina:

$$P = T\omega \quad (5)$$

em que  $\omega$  é a rotação do eixo da turbina em rad/s. Como os valores lidos pelo sensor de rotação acoplado ao Arduino fornecem leituras em RPM, utiliza-se a seguinte expressão para a correta conversão para o sistema internacional de unidades:

$$\omega = \frac{2\pi n_{RPM}}{60} \quad (6)$$

como dito anteriormente, a velocidade de rotação da turbina é influenciada pela velocidade de escoamento no interior do túnel aerodinâmico. A velocidade de escoamento não perturbada é dada por:

$$u_{\infty} = \sqrt{\frac{2p_{din}}{\rho}} \quad (7)$$

em que a massa específica do ar pode ser obtida através da equação de estado do gás ideal, na forma:

$$\rho = \frac{p_{atm}}{RT_{amb}} \quad (8)$$

sendo que  $R$  é a constante de gás ideal para o ar, com valor de 287,053 J/kgK. E a pressão dinâmica é dada por:

$$p_{din} = 15,625i - 62,5 \quad (9)$$

em que  $i$  é a corrente elétrica em mili Ampères (mA) lida no multímetro digital. Esta é uma expressão fornecida pelo próprio fabricante do transdutor de pressão e relaciona a pressão diferencial (dinâmica) lida com o sinal em corrente elétrica pelo instrumento.

Foi verificado que quando o inversor de frequência estava conectado, porém não estava ligado, o multímetro apresentou um valor de 4,00 mA, indicando uma pressão dinâmica no túnel aerodinâmico igual a zero, pois não havia escoamento no interior do túnel.

Uma placa Arduino Uno R3 foi utilizada na coleta dos dados da rotação do eixo da turbina, das massas da balança (célula de carga 1 – m1) e da carga (célula de carga 2 – m2), da diferença destas massas, da força de frenagem, do torque e da potência de frenagem aplicadas ao eixo da turbina eólica. Estes dados foram monitorados e coletados através da porta serial de um computador pessoal para posterior tratamento e confecção das curvas de torque e potência de frenagem da turbina eólica em função da rotação de seu eixo.

Para cada frequência lida no inversor foram realizadas pelo menos três frenagens na turbina. Durante o experimento, a turbina foi desacelerada até parar por completo e posta de novo em rotação para a obtenção de mais dados. Os experimentos foram realizados em dois dias, sendo necessário obter os valores das temperaturas e das pressões atmosféricas para cada dia, sendo que estes dois fatores influenciam na velocidade do escoamento não perturbado. Os valores na Tabela 2 indicam a temperatura e a pressão atmosférica nos dois dias de realização de experimentos.

Tabela 2 – Medições obtidas nos dois dias de experimento.

Grandeza	1° Dia	2° Dia
Temperatura [°C]	28	23
Pressão atmosférica [Pa]	101320	100610

Na Tabela 3 é mostrada os valores da velocidade de escoamento não perturbado no túnel aerodinâmico para as diferentes frequências do inversor.

Tabela 3 – Valores das velocidades de escoamento para cada frequência correspondente.

Dia	$f$ [Hz]	$i$ [mA]	$p_{din}$ [Pa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$u_{\infty}$ [m/s]
1°	30	5,17	18,28	1,1720	5,6
	40	6,03	31,72		7,4
2°	50	7,05	47,66	1,1835	9,0
	60	7,40	53,13		9,5

Na Tabela 3 observa-se os resultados das velocidades de escoamento. Cada curva plotada é referente a uma velocidade de escoamento no interior do túnel, sendo necessário para seu cálculo os valores da corrente elétrica, pressão dinâmica e massa específica do ar.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos experimentos são mostrados nas Figuras 9 e 10. Na Figura 9 são exibidas as curvas de torque em função da rotação do eixo da turbina eólica para diferentes velocidades de escoamento. Na Figura 10 são exibidas as curvas de potência em função da rotação do eixo da turbina eólica para diferentes velocidades de escoamento.

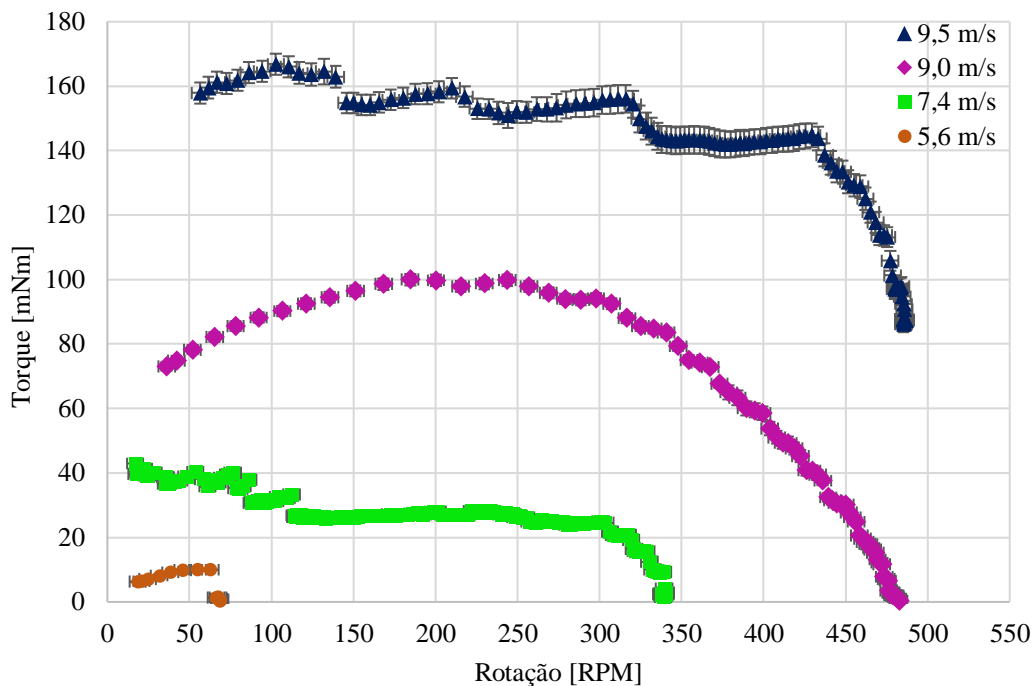


Figura 9 – Curvas de torque em função da rotação do eixo da turbina para diferentes velocidades de escoamento durante a realização do experimento da turbina eólica.

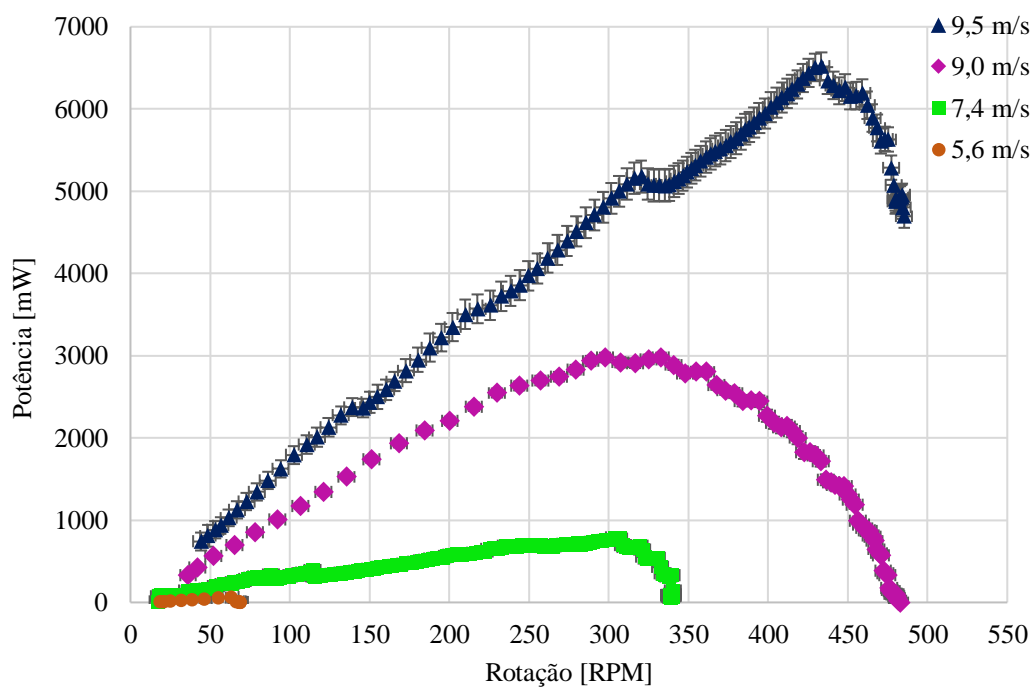


Figura 10 – Curvas de potência em função da rotação do eixo da turbina para diferentes velocidades de escoamento do túnel aerodinâmico durante a realização do experimento da turbina eólica.

É possível notar na Figura 9 o comportamento de aumento, pico e descida dos valores de torque em relação ao aumento da velocidade de rotação da turbina eólica para a velocidade de 9,0 m/s. Para a velocidade de escoamento de 9,5 m/s é possível encontrar o valor de torque máximo. No eixo das ordenadas os valores estão em mNm e no eixo das abscissas, a unidade é RPM, unidades encontradas na literatura para turbinas de pequeno porte. O valor máximo encontrado foi de 166 mNm para uma velocidade de rotação de 102 RPM.

Na Figura 10 é possível observar que as curvas de potência aumentam conforme o aumento da rotação da turbina, chegam em um valor máximo e, em seguida seus valores caem com o aumento da rotação do seu eixo. Comportamento este, semelhante com o que é encontrado na literatura. A máxima potência encontrada foi com a velocidade de rotação de 433 RPM, para a velocidade de escoamento de 9,5 m/s, com o valor de 6519 mW.

Também é possível notar que ocorrem variações no comportamento das curvas. Isso deve-se ao fato de a desaceleração da turbina depender da força aplicada no manete de freio. A força aplicada no manete de freio era uma hora constante e de repente uma maior aplicação de força aplicada para a turbina parar. Isso não se mostrou uma boa maneira de frear a turbina.

Foi possível notar nos experimentos que o estator faz uma diferença significativa na velocidade de partida da turbina eólica. Não foram coletados dados da turbina sem estator, mas pode-se perceber que a turbina eólica começava a girar para uma frequência no inversor com o estator que a mesma sem estator não girava.

Também é interessante mencionar que a ideia original envolvia um disco de freio para frear a turbina e acoplar um braço de alavanca para a medição do torque no eixo da turbina eólica. A adição do disco de freio com o braço de alavanca resultou em um aumento expressivo na massa total do sistema. Como a turbina eólica possui massa reduzida, o acoplamento dos dois componentes aumentou significativamente a inércia do sistema, e, com isso, a turbina não chegou a partir, mesmo para velocidades de escoamento mais altas no túnel aerodinâmico.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo experimental da medição das curvas de torque e potência mecânica de uma TEEV realizado no túnel aerodinâmico do LMF da UFRGS utilizando um freio de Prony. Foi possível coletar os dados de forma automática durante os experimentos e realizar a análise dos resultados.

Os resultados mostraram que as curvas de torque e potência da turbina para a velocidade de escoamento de 9,0 m/s são as que mais se assemelham com o que é encontrado na literatura. As curvas crescem conforme o aumento da rotação do eixo da turbina eólica, chegam em um valor máximo e, logo após, decrescem com o aumento da rotação. O valor do pico máximo do torque ocorre com uma rotação menor do que a rotação com o valor de pico máximo da potência, conforme o esperado.

A velocidade de rotação máxima encontrada foi de 530 RPM para uma frequência de 60 Hz ou velocidade de escoamento de 9,5 m/s. O valor de torque dinâmico máximo foi de 166 mNm para uma rotação de aproximadamente 102 RPM. A potência mecânica teve seu valor máximo com 433 RPM e seu valor foi de 6519 mW.

A turbina mostrou-se bastante sensível a variações de esforço. Sua rotação se eleva com um leve aumento da velocidade do escoamento e é preciso de pouca força para frear seu eixo.

A utilização de um manete de freio mostrou-se não ser a melhor opção para frear a turbina. A influência do operador na aplicação da força no manete de freio não garante uma desaceleração constante e nem a mesma força para todos os testes. E a força aplicada no manete de freio durante o experimento tem grande influência nos resultados.

Como os dados foram obtidos sem esperar a turbina estabilizar a rotação, não foi possível obter um resultado satisfatório da curva de coeficiente de potência em relação à razão de velocidade de ponta de pá. Isso acabou dificultando comparações e limitando análises.

A turbina utilizada no projeto em escala aumentada poderia ser empregada para produzir energia no topo de edificações de grandes centros urbanos. A turbina seria instalada no topo de um edifício posicionado próximo ao rio Guaíba, por exemplo, local com uma rugosidade relativamente baixa e com condições de vento durante o ano todo. O desempenho da turbina seria máximo no período da primavera, quando os ventos apresentam uma velocidade mais elevada, de acordo com o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul por Camargo-Schubert (2014).

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para estudos futuros, sugere-se que para a desaceleração da turbina utilize-se um dispositivo de frenagem eletromagnético, como um freio de Foucault. Pois, assim, a interferência de um mecanismo nos resultados é mínima, não havendo atrito entre o eixo da turbina e o dispositivo de frenagem e não há a interferência de um operador.

Sugere-se a troca das pás da turbina de MDF por pás fabricadas em impressoras 3D. Com isso, não há chance de absorção de umidade das pás ao longo do tempo com o novo material.

Outra sugestão é a de apoiar o eixo da turbina em mancais, diminuindo a vibração do eixo.

Também sugere-se utilizar este trabalho para o conhecimento da melhor configuração do estator para a turbina. Será possível se basear neste trabalho para realizar simulações numéricas para diferentes tipos de estatores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboelezz, A.; Ghali, H.; Elbayomi, G.; Madboli, M., **A novel VAWT passive flow control numerical and experimental investigations: Guided Vane Airfoil Wind Turbine**, Ocean Engineering, Volume 257, 2022.

Baptista, P. G. D. **Freio dinamométrico para ensaio de pequenos veículos de tracção eléctrica**. 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

Barros, L. S.; Taveiros, F.; Costa, F. B., **Wind turbine torque-speed feature emulator using a DC motor**, Brazilian Power Electronics Conference, 2013.

Camargo-Schubert Engenharia Eólica; Eletrosul Centrais Elétricas., **Atlas eólico: Rio Grande do Sul**, Secretaria do Desenvolvimento e Promoção do Investimento: Agência Gaúcha do Desenvolvimento e Promoção do Investimento, 73-76 p., Porto Alegre, 2014.

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 omnidirectionguide-vane**”, Renewable Energy, Vol. 112, p. 601-609, 2013.

Custódio, R. S.; **Energia eólica para a produção de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2013.

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.

Gasch, R.; Twele, J. "**Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**". Springer, 2nd edition, 2012.

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.

Mertens, S., **Wind energy in urban areas: Concentrator effects for wind turbines close to buildings**, Refocus, March/April, p. 22-24, 2002.

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.

Taylor, J.R. **An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**. California University Science Books, 2ª edição, 1997.

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

### Análise de Incertezas

Para calcular as incertezas é necessário ter as informações dos equipamentos utilizados nos experimentos disponibilizadas pelos fabricantes, segundo Taylor (1997). E a propagação dessas incertezas é calculada através de uma regra muito utilizada, conhecida como regra de Kline e McClintock (1953). Essa regra é expressa por:

$$\Delta Z = \sqrt{\sum_{n=1}^q \left( \frac{\delta Z}{\delta X_n} \Delta X_n \right)^2} \quad (\text{A.1})$$

em que  $\Delta Z$  é a incerteza do resultado em função das variáveis independentes  $X_n$ .  $\Delta X_n$  é a incerteza da variável  $X_n$  e  $q$  é o número de variáveis.

### Incerteza da Força

Para a medição da força foram utilizadas duas células de carga com módulo conversor amplificador HX711 com faixa de leitura de até 1 kg. A resolução da célula de carga é de 0,001 g e possui incerteza de  $\pm 5$  g informada pelo fabricante. Sendo assim, a incerteza da força é de 0,049 N.

### Incerteza do Braço de Alavanca

Para a incerteza do braço de alavanca utilizou-se um paquímetro digital. O braço de alavanca é constituído pelo raio do eixo da turbina somado ao diâmetro do barbante. A incerteza do paquímetro informada pelo fabricante foi de  $\pm 0,2$  mm.

### Incerteza do Torque

A incerteza do torque é resultado da propagação das incertezas da força e do braço de alavanca. A incerteza do torque pode ser calculada como segue:

$$\Delta T = \sqrt{\left( \frac{\delta T}{\delta F} \Delta F \right)^2 + \left( \frac{\delta T}{\delta d} \Delta d \right)^2} \quad (\text{A.2})$$

em que  $\Delta T$  é a incerteza propagada no torque,  $\Delta F$  é incerteza da força e  $\Delta d$  é a incerteza do braço de alavanca.

### Incerteza da Velocidade de Rotação

A velocidade de rotação foi medida utilizando um sensor de obstáculo reflexivo infravermelho LM393. A sua incerteza fornecida pelo fabricante equivale  $\pm 5$  RPM.



## Incerteza da Potência

A propagação das incertezas do torque e da velocidade de rotação resultam na incerteza da potência. Essa incerteza é obtida da seguinte forma:

$$\Delta P = \sqrt{\left(\frac{\delta P}{\delta T} \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\delta P}{\delta \omega} \Delta \omega\right)^2} \quad (\text{A.3})$$

sendo  $\Delta P$  a incerteza propagada na potência,  $\Delta T$  é a incerteza do torque e  $\Delta \omega$  é a incerteza da velocidade de rotação.

A Figura A.1 mostra em detalhes as curvas de torque e potência com as incertezas calculadas para a frequência de 30 Hz ou velocidade de escoamento de 5,6 m/s.

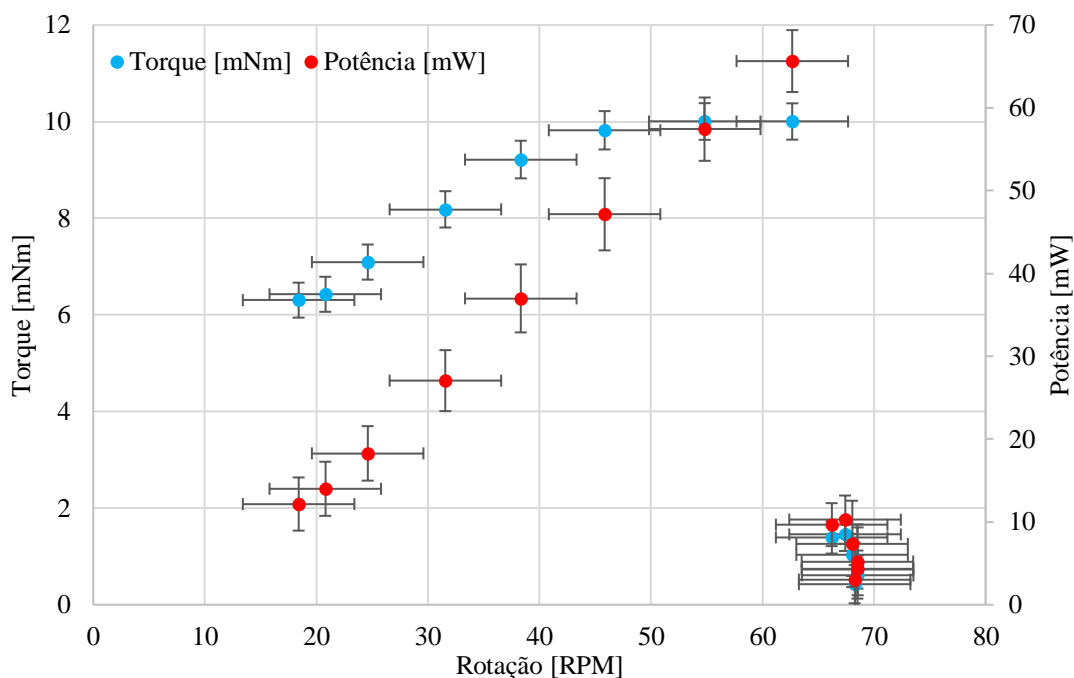


Figura A.1 – Curvas de torque e potência com as incertezas calculadas para a velocidade de escoamento de 5,6 m/s.

A Figura A.2 mostra em detalhes as curvas de torque e potência com as incertezas calculadas para a frequência de 40 Hz ou velocidade de escoamento de 7,4 m/s.

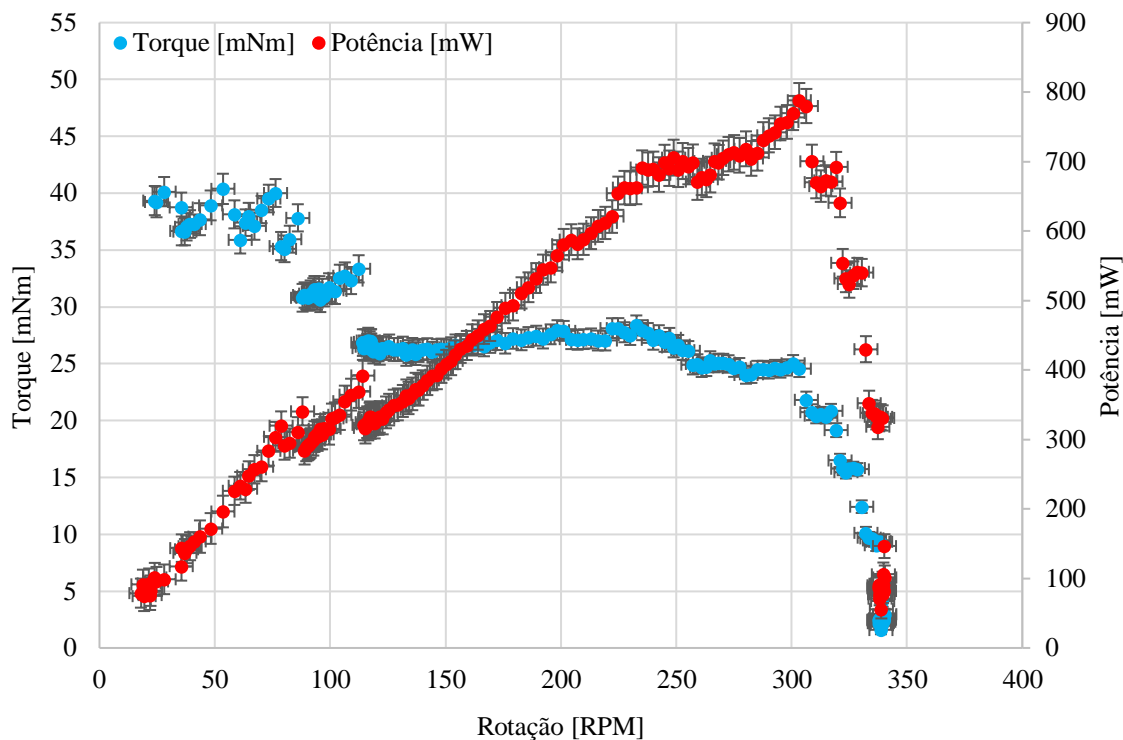


Figura A.2 – Curvas de torque e potência com as incertezas calculadas para a velocidade de escoamento de 7,4 m/s.

A Figura A.3 mostra em detalhes as curvas de torque e potência com as incertezas calculadas para a frequência de 50 Hz ou velocidade de escoamento de 9,0 m/s.

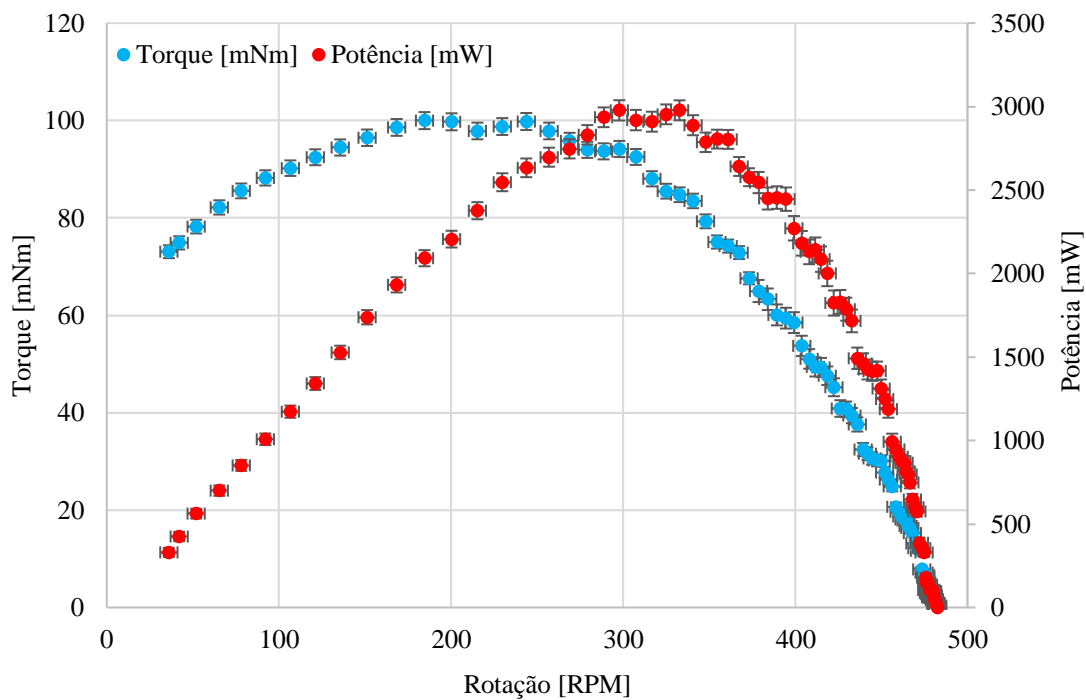


Figura A.3 – Curvas de torque e potência com as incertezas calculadas para a velocidade de escoamento de 9,0 m/s.

Já a Figura A.4 mostra em detalhes as curvas de torque e potência com as incertezas calculadas para a frequência de 60 Hz ou velocidade de escoamento de 9,5 m/s.

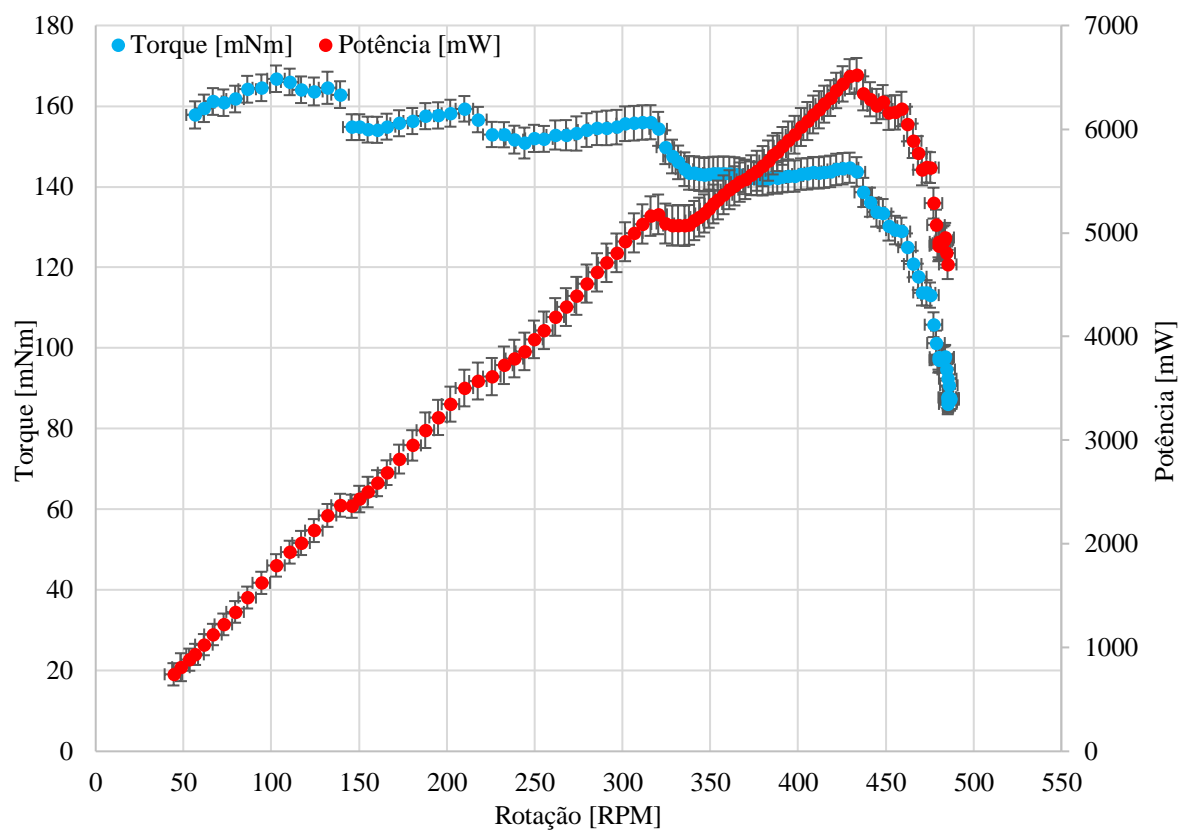


Figura A.4 – Curvas de torque e potência com as incertezas calculadas para a velocidade de escoamento de 9,5 m/s.