

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

Estudo Comparativo entre Direcionadores de Escoamento para uma Turbina Eólica de Eixo
Vertical

por

André 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, Junho 2015



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

Estudo Comparativo entre Direcionadores de Escoamento para uma Turbina Eólica de Eixo Vertical

por

André 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. Dr^a Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Jorge R. S. Zabadal

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Porto Alegre, 12 de junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Alexandre Vagtinski de Paula, pela orientação e toda a atenção que me foi dedicada durante a realização do presente trabalho.

Aos laboratórios de Mecânicas do Flúidos (LMF) e o de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos (Leta) que sempre disponibilizaram seus equipamentos e instalações, que sem os quais o presente trabalho não seria possível.

Agradeço por fim à minha família, pais e tios, Luis e Nelci, Dorvalino e Marlene e aos meus irmãos, Luciano e Carine por todo o suporte durante esses anos de ensino superior.

OLIVEIRA, A. Estudo Comparativo entre Direcionadores de Escoamento para uma Turbina Eólica de Eixo Vertical. 2015. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Tendo em vista a conjuntura atual do mercado de energia elétrica mundial, fica evidente a necessidade do desenvolvimento e aprimoramento de fontes alternativas de energia. Sabe-se que é possível explorar melhor o potencial eólico em ambientes urbanos, já que este apresenta algumas vantagens frente à forma que hoje se explora esse tipo de energia. Vantagens essas que podem ser citadas como a menor perda de energia devido às longas linhas de transmissão, gastos com transporte e logística de ferramentas entre outros.

Embora os ventos encontrados em ambientes urbanos não sejam propícios para utilização das turbinas eólicas comumente utilizadas, seja pelas grandes dimensões ou pela ineficiência devido as condições encontradas, se podem utilizar turbinas eólicas com outras características, assim como as turbinas eólicas de eixo vertical, as quais apresentam um melhor desempenho nas condições de vento encontradas em ambientes urbanos. Esse tipo de turbina não é tão eficiente quanto às turbinas de eixo horizontal hoje utilizadas em parques eólicos, mas apresentam um desempenho satisfatório quando integradas com dispositivos que ajudam a melhorar sua eficiência. O dispositivo apresentado nesse trabalho trata-se de um direcionador de escoamento, o qual baseia seu funcionamento no aumento da velocidade do fluxo de ar entregue à turbina eólica, juntamente com a diminuição da área de torque negativo das pás da turbina.

O presente trabalho busca otimizar e comparar resultados com um direcionador construído por Chong et al., 2013. Para a confecção dos modelos a serem ensaiados, as escalas foram reduzidas devido aos custos inerentes de fabricação e às dimensões limitantes do túnel de vento utilizado nos ensaios. Os experimentos foram realizados em um túnel de vento de circuito aberto onde medições de rotação e tensão gerada pela turbina eólica de eixo vertical foram tomadas sem e com a presença de ambos os direcionadores.

Foi possível confirmar a melhora de performance com a utilização do direcionador, mas no entanto, a diferença não foi tão grande quanto à encontrada na literatura. A qualidade inferior do material utilizado na confecção da turbina eólica pode ter interferido nos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Direcionador de escoamento, turbina eólica de eixo vertical, túnel de vento.

OLIVEIRA, A. **Comparative Study between Flow Drivers for Vertical Axis Wind Turbine.** 2015. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

Bearing in mind the current situation of the global electricity market, it is evident the need for the development and improvement of alternative energy sources. It is known that it is possible to exploit the wind potential in urban environments, as this presents some advantages to form what is now exploits this type of energy. Advantages that can be cited as the lower power loss due to long transmission lines, spending on transportation and logistics tools, among others.

Although winds encountered in urban environments which are not suited the use of commonly used wind turbines, through the large or the inefficiency due to conditions found, can be used wind turbines with other features, as well as the vertical axis wind turbines, which have a better performance in windy conditions encountered in urban environments. This type of turbine is not as efficient as the horizontal axis turbines used today in wind farms but perform satisfactorily when integrated with devices that help improve their efficiency. The device presented in this paper is a flow driver, which bases its operation on increasing the speed of the air flow delivered to the wind turbine along, together with the decreasing the negative torque area of the turbine blades.

This study aims to optimize and compare results with a driver built by Chong et al., 2013. For making models to be tested, the scales were reduced due to inherent manufacturing costs and limiting dimensions of the wind tunnel used in the trials. The experiments were performed in an open circuit wind tunnel whose rotation and voltage generated by the vertical axis wind turbine was taken with and without the presence of both drivers.

It was possible to confirm the improvement in performance with the use of the driver. However, the difference was not as great as that found in the literature. The lower quality used in the manufacture of wind turbine material may have affected the results.

KEYWORDS: Flow drivers, Vertical Wind Axis Turbine, Wind tunnel.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	Erro! Indicador não definido.
2.1.	Energia Eólica	2
2.2.	Recursos eólicos.....	2
2.3.	Turbinas Eólicas.....	2
2.4.	Efeito de Venturi.....	3
2.5.	Direcionador de escoamento.....	3
3.	METODOLOGIA	3
3.1.	Túnel de Vento.....	3
3.2.	Levantamento do perfil de velocidade.....	4
3.3.	Construção do Protótipo do Direcionador de Escoamento	4
3.4.	Construção da turbina eólica do tipo H-Darrieus.....	5
3.5.	Equipamentos Utilizados para a Medição.....	6
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	7
5.	CONCLUSÕES	13
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
7.	APÊNDICES	16
8.	ANEXOS	17

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica a partir do vento expandiu-se no mundo de forma acelerada ao longo das últimas décadas. Só no Brasil, segundo o Boletim de Energia Eólica (2014), a capacidade instalada dos parques eólicos em operação comercial em janeiro de 2014 foi de 2.211 MW, 20% maior que a capacidade registrada no mesmo mês do ano anterior. No entanto, embora os recursos e incentivos destinados venham aumentando, a energia eólica no Brasil ainda tem uma pequena representatividade na matriz elétrica nacional. De acordo com o Ministério de Minas e Energias, 2015, a participação da energia eólica na OIEE (Oferta Interna de Energia Elétrica) do ano de 2013 foi de apenas 1,1%. Logo, fica claro que há uma grande oportunidade de desenvolvimento de mercado e tecnologias para inovação na área.

Atualmente, a energia eólica, praticamente em sua totalidade, é produzida em parques eólicos na zona rural e transmitida para zonas urbanas. Contudo, pelo fato desses parques estarem em regiões distantes dos centros urbanos, problemas associados, como a logística do transporte de equipamentos, de transmissão e aspectos ambientais, se fazem presentes [Associação Brasileira de Energia Eólica, 2012]. Uma das possíveis soluções para esses problemas ligados à distância entre a geração e o consumo da energia, pode ser a transferência dos equipamentos geradores de energia para o próprio centro de consumo [Chong et al., 2011].

Devido às suas dimensões, é evidente que, sem uma integração prevista na concepção inicial de estruturas da área urbana, a utilização de rotores das turbinas eólicas utilizados em parques não seria viável para grandes centros. Somado a isso, os ventos fracos e turbulentos, condições geralmente encontradas em áreas urbanas devido aos prédios mais altos, devem ser consideradas [Knight J., 2004]. Assim, percebe-se que para o aproveitamento dos ventos das áreas urbanas, faz-se necessário a utilização de turbinas que possam ser eficientes mesmo nas condições descritas.

As turbinas eólicas de eixo vertical são particularmente adequadas para as condições encontradas em centros urbanos. Essas turbinas possuem bom funcionamento mesmo em ambientes turbulentos, com efeito, segundo Homicz, 1991, a eficiência das turbinas de eixo vertical aumenta com esse tipo de escoamento. Além disso, esse tipo de turbina funciona com baixas velocidades de *cut-in*, possui bom comportamento de partida, simplicidade na fabricação, e diferente das turbinas de eixo horizontal, consegue captar ventos a partir de qualquer direção [Peacock et al., 2008; Müller et al., 2009].

Tendo em vista as considerações acima, fica evidente que, utilizando-se turbinas eólicas de eixo vertical, a captação da energia do vento em áreas urbanas tem um grande potencial. Para tal, foram realizados estudos com o intuito de melhorar a eficiência das turbinas. 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, reduz ainda mais a velocidade de *cut-in* e minimiza a zona de torque negativo da turbina. Esse dispositivo é projetado para ser integrado à turbina eólica de eixo vertical e instalado no topo de edifícios. Pode ser de formato cilíndrico ou qualquer outra forma de projeto, dependendo do perfil arquitetônico do edifício onde será instalado. É constituído de um duto interior e outro exterior, tendo entre esses, pás fixas com determinada angulação que servem para direcionar o vento às pás motoras da turbina eólica.

O presente trabalho tem por objetivo criar um modelo com variação das dimensões propostas no modelo desenvolvido por Chong et al., 2013, através de modificações do projeto, a fim de que essas variações de projeto e dimensões possam apresentar melhores resultados dos que os apresentados no trabalho usado como referência. Serão construídos dois modelos com escala reduzida, um idêntico ao proposto por Chong et al., 2013 e outro modificado. Para comparação entre a eficiência dos diferentes modelos do dispositivo serão realizados testes experimentais em um túnel de vento de circuito aberto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Energia Eólica

A energia eólica é gerada por meio de aereogeneradores, nos quais a força do vento é captada por hélices ligadas a uma turbina que aciona um gerador elétrico. A quantidade de energia transferida é função da densidade do ar, da área coberta pela rotação das pás (hélices) e da velocidade do vento [MMA, 2015]. A relação entre essas grandezas é dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 \quad (2.1)$$

em que $P_{eólica}$ a potência em (W), ρ a densidade do ar em (kg/m³), V_{∞} a velocidade do vento em (m/s) e A a área perpendicular ao escoamento considerada em (m²). Note-se a importância de V_{∞} com uma dependência cúbica. A densidade do ar diminui com a altitude, de acordo com a atmosfera ISA, ρ varia entre 1,2250 kg/m³ ao nível do mar para 1,0065 kg/m³ a 2 km de altitude. Nota-se também a importância da humidade relativa e da temperatura do ar cujos aumentos fazem diminuir ρ [Silva, 2011].

A avaliação técnica do potencial eólico exige um conhecimento detalhado do comportamento dos ventos. Os dados relativos a esse comportamento - que auxiliam na determinação do potencial eólico de uma região - são relativos à intensidade da velocidade e à direção do vento. Para obter esses dados, é necessário também analisar os fatores que influenciam o regime dos ventos na localidade do empreendimento. Entre eles pode-se citar o relevo, a rugosidade do solo e outros obstáculos distribuídos ao longo da região [ABEEólica, 2013].

2.2. Recursos eólicos

Só a partir dos mil metros de altura é que a superfície terrestre deixa de ter influência significativa sobre o vento. Nas camadas mais baixas a velocidade do vento é afetada pela fricção com a superfície terrestre. Em geral, quanto maior a rugosidade do terreno maior o abrandamento do vento. Como pode ser visto na Figura 2.1 um bosque ou uma grande cidade abrandam muito o vento, classe de rugosidade 3 a 4 (definição utilizada pela indústria eólica para classificar a rugosidade), uma pista de um aeroporto, ou planície abrandam apenas ligeiramente o vento, classe 0,5-1, enquanto que a superfície do mar ou de um lago tem uma influência quase nula, classe 0 [GELATTI, 2009].

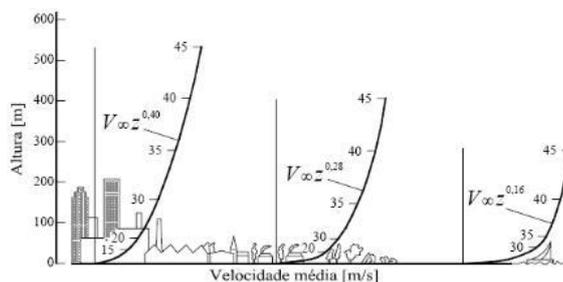


Figura 2.1 - Perfil da velocidade média sobre terrenos de distinta rugosidade FONTE: LOREDO-SOUZA, 2006.

2.3. Turbinas Eólicas

Sua operação é abalizada nas teorias de mecânica dos fluidos e alguns elementos de aerodinâmica. As turbinas eólicas podem ser de dois tipos: tipo *drag* (resistência) e tipo *lift* (sustentação). Nas turbinas tipo *drag*, a força motriz é a resistência aerodinâmica enquanto nas

de tipo *lift* é a sustentação aerodinâmica. A utilização de cada conceito implica diferenças no seu desenvolvimento.

Além da primeira divisão entre turbinas do tipo *lifting* e *drag*, pode-se dividi-las também em turbinas de eixo vertical e turbinas de eixo horizontal.

Um estudo comparativo entre os dois tipos de turbinas eólicas realizado por Eriksson et al., 2006, apresenta os mais importantes aspectos incluindo dinâmica estrutural, sistema de controle, construção, equipamento elétrico e manutenção. Nesse estudo é possível identificar motivos pelos quais as turbinas verticais possuem vantagens frente às turbinas de eixo horizontal quando trata-se de aplicação em ambientes urbanos.

2.4. Efeito de Venturi

Quando os fluidos viajam através de tubos podem produzir um curioso efeito de aspiração, chamado efeito de Venturi. Isto se deve a fatores como a pressão, a velocidade e o trinômio de Bernoulli.

O efeito é explicado pelo Princípio de Bernoulli e o princípio de continuidade de massa. Se o caudal de um fluido é constante, mas a seção diminui, necessariamente a velocidade aumenta após atravessar esta seção. Pelo teorema da conservação da energia se a energia cinética aumenta, a energia determinada pelo valor da pressão diminui obrigatoriamente.

2.5. Direcionador de escoamento

O conceito trabalhado no direcionador de escoamento é diminuir a zona de torque negativo da turbina e reduzir a turbulência e a flutuação de velocidade rotacional que influenciam na vida útil dos componentes da turbina. Este dispositivo mostrou ser capaz de melhorar a performance das turbinas em termos da energia transmitida, velocidade rotacional, comportamento de auto acionamento e melhora nas questões que envolvem ruído e segurança pública. Na Tabela 2.1 é possível ver os resultados da utilização do direcionador integrado à turbina.

Tabela 2.1 - Resumo do desempenho de uma turbina de eixo vertical com e sem direcionador.
Fonte: Chong et al., 2013.

Parâmetros	Turbina sem Direcionador	Turbina com Direcionador Integrado	Razão de Aumento
Torque Máximo	11,25 mNm	23,64 mNm	2,10
Velocidade Rotacional	77,4 rpm	144,4 rpm	1,87
Energia Gerada	0,1252 W	0,4352 W	3,48

3. METODOLOGIA

Nesta seção, são descritos de forma minuciosa os passos necessários para realização dos experimentos, como os mesmos foram realizados, quais os equipamentos e instalações utilizadas durante o período de testes, os materiais usados na construção dos modelos, a forma de fixação e posicionamento na seção de testes.

3.1. Túnel de Vento

Fundamentalmente, um túnel de vento possui um ventilador, o qual faz a sucção do escoamento de ar na direção de um objeto em seu interior, sendo esse construído em escala real ou reduzida. Podem ser realizados estudos sobre como o ar interage com o objeto ou então como as correntes de ar fluem sobre as variadas superfícies.

Os experimentos realizados durante o período de execução deste trabalho foram desenvolvidos no túnel de vento situado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS. O túnel de vento de circuito aberto, com uma seção de testes de 1 m de largura, 1 m de altura é equipado com um motor elétrico de 8 cv, um ventilador axial de 12 pás e um inversor de frequências Tektronix K212, que elimina os efeitos de oscilação da tensão da rede elétrica sobre a rotação do ventilador, além de um controle preciso e refinado da sua frequência de rotação, que está linearmente ligada à velocidade do escoamento. A frequência de operação deste inversor varia de 0 a 60 Hz, o que possibilita uma velocidade de até 15 m/s, dependendo intrinsecamente da temperatura ambiente, que deve ser sempre monitorada e controlada de maneira a não ser observada uma variação maior do que 1 °C durante os testes.

3.2. Levantamento do perfil de velocidade

De acordo com Garré et al., 2015, os perfis de velocidades transversais da seção de testes do túnel de vento do LMF da UFRGS estão ilustrados na Figura 3.1, para as frequências de 30 e 40 Hz de alimentação de seu motor elétrico, de onde se observa um comportamento suave de variação de velocidades ao longo de sua seção de testes. As velocidades médias para o centro do túnel de vento encontradas foram 9 m/s para 30 Hz e 11 m/s para 40 Hz.

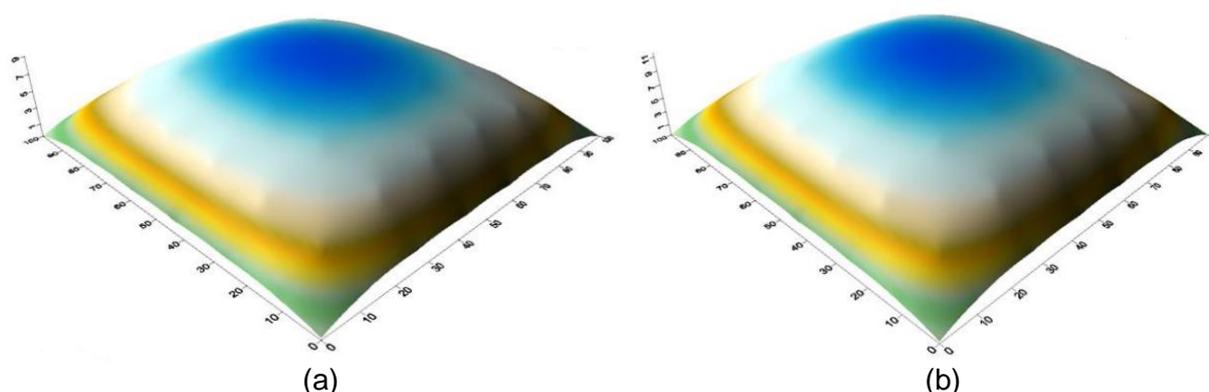


Figura 3.1 - Perfis de velocidades transversais da seção de testes do túnel de vento do LMF da UFRGS: (a) 30 Hz e (b) 40 Hz.

3.3. Construção do protótipo do direcionador de escoamento

Foram construídos dois protótipos, tendo como base para a construção o modelo descrito por Chong et al., 2013. Na Figura 3.2 são apresentadas as vistas dos modelos.

Para o presente trabalho foi necessário fazer uma redução de escala do modelo construído por Chong et al., devido aos altos custos inerentes ao processo de fabricação e também devido às limitações que encontramos para a realização dos testes, já que a seção do túnel de vento não permite ao protótipo uma área maior do que 30% da área de seção de testes. Do contrário, a razão de bloqueio seria muito alta, o que acabaria interferindo na tomada de medidas. A seção dos modelos testados no túnel de vento foi de aproximadamente 10% da seção do túnel de vento.

Com exceção das pás direcionadoras de ar todas as dimensões utilizadas para os dois protótipos são iguais. Na Figura 3.2 é possível verificar essas dimensões com a escala já reduzida, proporcionalmente, em comparação ao protótipo original construído por Chong et al., 2013. Nota-se a diferença de altura entre o diâmetro interno e o diâmetro externo do direcionador. Essa diferença tem como propósito utilizar-se do efeito de Venturi, aumentando a velocidade do ar que será direcionado à turbina.

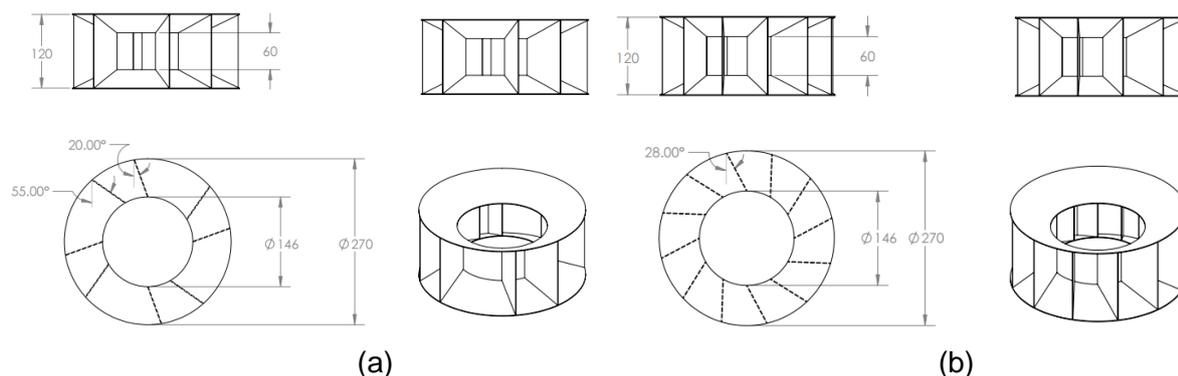


Figura 3.2 - Vistas do modelo de Direcionador: (a) Proposto por Chong et al., 2013 e (b) Proposto no presente trabalho.

A diferença entre a angulação e número das pás direcionadoras de escoamento para o modelo de Chong et al., 2013 e modelo aqui proposto pode ser verificada nas Figura 3.2.

Essa variação proposta para os ângulos das pás do direcionador tem por objetivo diminuir a componente da força normal do vento que é desperdiçada no direcionador, tendo em vista que quanto menor o ângulo de ataque das pás, maior será a energia do vento transmitida à turbina.

A proposta do aumento do número de pás é inerente a diminuição do ângulo de ataque das mesmas juntamente com o intuito de tornar o direcionador completamente simétrico, evitando assim que a eficiência do direcionador possa depender de determinadas direções do vento.

Outra importante diferença entre os dois protótipos é que no novo modelo proposto, pelo fato de possuir mais pás, permite a entrada de vento quase que exclusivamente para as pás de avanço da turbina, o que espera-se resultar numa melhor performance quando comparado ao modelo proposto por Chong et al.

Os protótipos são constituídos de dois materiais, polímero PLA para a confecção das partes cônicas, e isopor cartonado para as pás. As partes cônicas foram construídas com a utilização de uma impressora 3D devido à dificuldade de obtenção das dimensões e precisão necessárias. Não optou-se por fabricar as pás com a impressora 3D devido ao custo de operação da mesma, além do que o material utilizado na confecção das pás era de fácil manuseio através de um estilete, podendo fazer um ajuste mais preciso com o auxílio de uma lixa.

3.4. Construção da turbina eólica do tipo H-Darrieus

A aerodinâmica de turbinas eólicas está ligada a distribuição das forças aerodinâmicas nas pás de seus rotores e em suas estruturas. O projeto de rotores modernos incluem a escolha do número de pás, aerofólios, a distribuição de corda e ângulo de passo, e os materiais envolvidos. Para construção da turbina eólica inicialmente determinou-se o tipo de turbina a ser integrada à edificação, para tal escolheu-se o modelo H-Darrieus pela sua maior facilidade de montagem. Em seguida foi escolhido o perfil NACA 0015 (Figura 3.6), com 30 mm de corda, e 60 mm de altura para as pás.



Figura 3.6 – Perfil das pás - NACA 0015.

A quantidade de pás escolhidas para composição de cada turbina foi quatro, já que, segundo Tangler, 1995, sabe-se que, para turbinas de grande porte, um rotor de quatro pás resulta em menor fadiga para as mesmas e menos ruído que um rotor de duas e três pás. O equilíbrio dinâmico de um rotor de quatro pás é maior, devido ao ângulo de 90° , sem contar o fato de que há uma maior facilidade para montagem do protótipo. As pás foram confeccionadas através do processo de lixamento da madeira balsa, material flexível, fácil de moldar, com boa resistência, tornando assim as turbinas mais leves, tendo em vista que quanto mais leve as turbinas forem, maior será a quantidade de rotações por minuto, e conseqüentemente maior será potência gerada. Na Figura 3.7 é possível visualizar a montagem final da turbina eólica.

A turbina foi alocada no centro da estrutura que apoia o sistema, estrutura essa em formato retangular para simular uma edificação comum. O pino inferior do eixo foi fixado ao eixo do motor que por sua vez foi colado à base, já o pino superior foi alocado dentro de um suporte, de maneira que o eixo sofresse a menor flexão possível. Inicialmente se utilizou um rolamento, mas devido ao alto atrito, optou-se por uma resina Epoxi lubrificada com óleo.

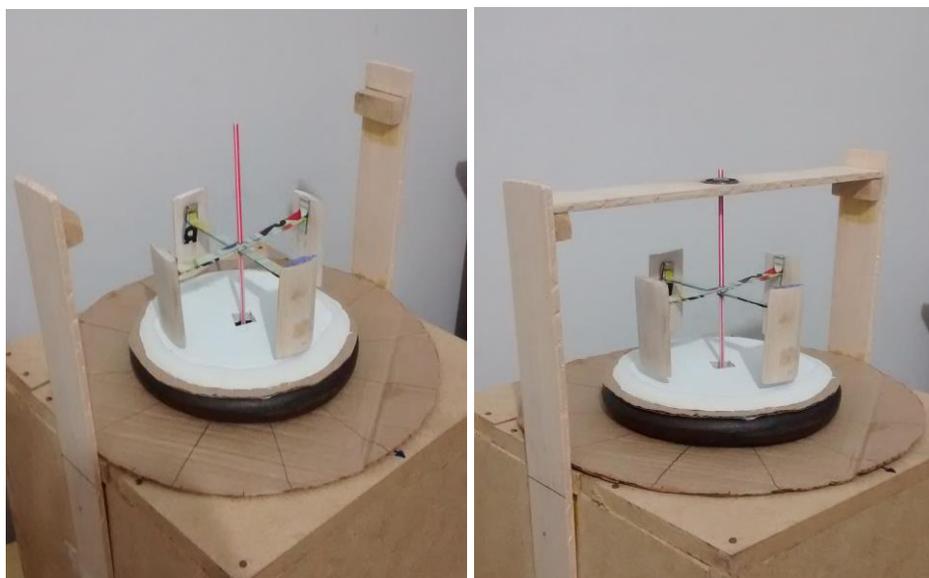


Figura 3.7 – Montagem final da turbina eólica.

3.5. Equipamentos Utilizados para a Medição

Na Figura 3.8 pode ser visto o conjunto todo montado, assim como foi utilizado para realização da tomada das medidas. Para a tomada da tensão gerada pela turbina se utilizou um motor Mabuchi RF-300ca-09550 (datasheet pode ser consultado no Anexo A) conectado diretamente com um multímetro digital Politem POL-79C de 4 dígitos (especificações técnicas do aparelho podem ser consultadas no Anexo C).

Para a leitura da velocidade rotacional da turbina foi utilizado um tacômetro digital Minipa MDT-2244B (as especificações gerais assim como o endereço do manual do aparelho podem ser encontradas no Anexo B).

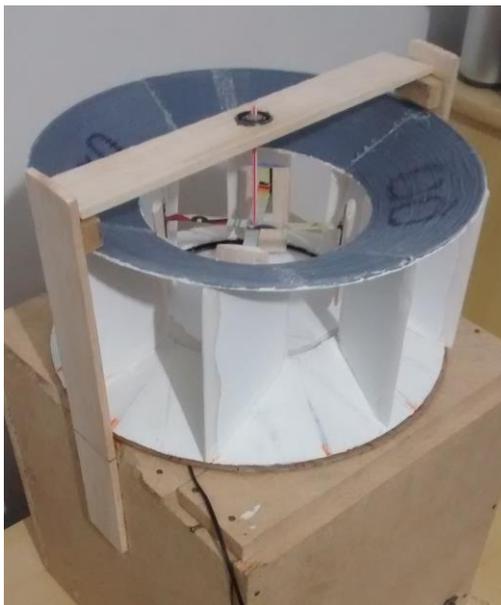


Figura 3.8 – Conjunto montado: turbina, direcionador e estrutura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com os experimentos realizados no túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS. Como a utilização de impressora 3D é dispendiosa, optou-se por montar e testar primeiramente o protótipo proposto neste trabalho para após utilizar as mesmas partes cônicas para a montagem e testes do protótipo proposto por Chong et al., 2013.

Sabendo pela literatura que o direcionador favorece o início da rotação e a continuidade de movimento rotacional da turbina, inicialmente procurou-se realizar os testes da turbina sem a presença do direcionador. Isso para estimar uma velocidade mínima do vento com a que a turbina seria capaz de manter seu bom funcionamento. Assim, foi determinado que as tomadas de medidas seriam realizadas utilizando-se velocidades de 9 e 11 m/s.

Os dados medidos tanto pelo tacômetro digital quanto pelo multímetro digital foram registrados durante 20 segundos com o auxílio de uma câmera digital, a fim de evitar erros de leitura. Nas Tabelas 4.2 e 4.3 são apresentados respectivamente os dados de rotação e tensão para cada uma das duas velocidades do vento incidente obtidos por meio das técnicas experimentais para a seção de testes da turbina sem a presença do direcionador. A incerteza do tacômetro digital, segundo o catálogo do fabricante é de $\pm 0,05\%$ da leitura + 1 dígito. Para o multímetro digital, na faixa de medidas tomadas, o catálogo do fabricante indica uma incerteza de 0,3% da leitura +10 dígitos.

Como as tomadas de medidas para os dois direcionadores foram realizadas em dias diferentes, a temperatura e pressão atmosférica no laboratório foram registradas respectivamente com o auxílio de um barômetro de Torricelli e um termômetro a álcool, a fim de que possíveis variações dos resultados pudessem ser devidamente ajustadas. A Tabela 4.1 apresenta as condições meteorológicas para o primeiro dia de testes.

Tabela 4.1 – Pressão Atmosférica e Temperatura no primeiro dia de testes.

	Valores
Pressão atmosférica	1005,25 hPa
Temperatura ambiente	22° C

Tabela 4.2 – Medidas da Rotação da turbina sem a presença do Direcionador.

Velocidade do Vento	1	2	3	4	5	Média (RPM)	Incerteza (Δ RPM)
9 m/s	568	571	567	554	565	565	$\pm 0,634$
11 m/s	812	815	810	817	806	812	$\pm 0,910$

Tabela 4.3 – Tensão medida no gerador elétrico sem a presença do Direcionador.

Velocidade do Vento (m/s)	1	2	3	4	5	Média (mV)	Incerteza (Δ mV)
9 m/s	474	480	480	473	467	475	$\pm 3,208$
11 m/s	676	672	663	674	670	671	$\pm 4,524$

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5 são referentes à seção de testes com a presença do direcionador proposto nesse trabalho.

Tabela 4.4 – Medidas da Rotação da turbina com a presença do Direcionador proposto no presente trabalho.

Velocidade do Vento (m/s)	1	2	3	4	5	Média (RPM)	Incerteza (Δ RPM)
9 m/s	610	612	617	615	606	612	$\pm 0,686$
11 m/s	820	825	829	828	838	828	$\pm 0,928$

Tabela 4.5 - Tensão medida no gerador elétrico com a presença do Direcionador.

Velocidade do Vento (m/s)	1	2	3	4	5	Média (mV)	Incerteza (Δ mV)
9 m/s	513	510	515	517	510	513	$\pm 3,464$
11 m/s	670	677	675	684	679	677	$\pm 4,564$

Nas Figura 4.1, e 4.2, é representado respectivamente em forma de gráficos a variação da rotação da turbina e da tensão medida no gerador elétrico em função da velocidade do vento incidente, tendo nos respectivos gráficos os dados levantados para a os testes da turbina sem e com a presença do direcionador. Os dados nos gráficos apresentados são tomados a partir das Tabelas 4.2 e 4.3, 4.4 e 4.5.

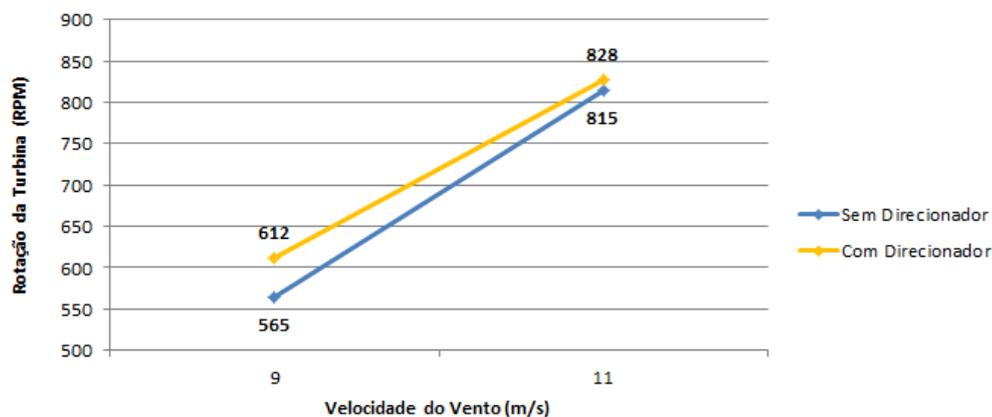


Figura 4.1 – Rotação da turbina em função da velocidade do vento incidente. Resultados para turbina sem e com a presença do Direcionador.

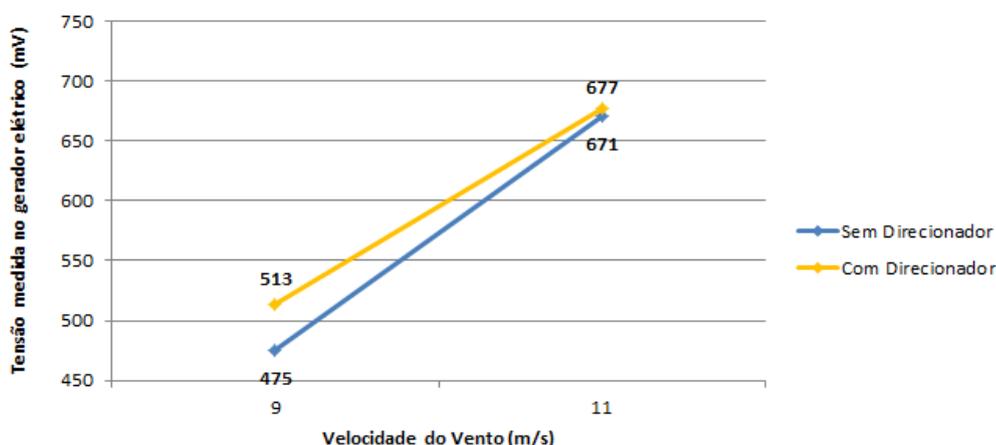


Figura 4.2 – Tensão medida no gerador elétrico em função da velocidade do vento incidente. Resultados para turbina sem e com a presença do Direcionador.

De acordo com o já mencionado, na Tabela 4.6 seguem as tomadas de temperatura e pressão atmosférica do laboratório para a data em que o segundo teste foi realizado - Direcionador proposto por Chong et al., 2013.

Tabela 4.6 – Pressão Atmosférica e Temperatura no segundo dia de testes.

	Valores
Pressão atmosférica	1015,15 hPa
Temperatura ambiente	17° C

Nas Tabelas 4.7 e 4.8 são indicadas as tomadas de medidas para a turbina sem a presença do direcionador. Medidas tomadas no segundo dia de testes.

Tabela 4.7 – Medidas da Rotação da turbina sem a presença do Direcionador.

Velocidade do Vento (m/s)	1	2	3	4	5	Média (RPM)	Incerteza (Δ RPM)
9 m/s	564	562	578	574	587	573	$\pm 0,643$
11 m/s	820	815	812	819	819	817	$\pm 0,916$

Tabela 4.8 - Tensão medida no gerador elétrico sem a presença do Direcionador.

Velocidade do Vento (m/s)	1	2	3	4	5	Média (mV)	Incerteza (Δ mV)
9 m/s	484	482	475	479	485	481	$\pm 3,249$
11 m/s	680	685	680	677	688	682	$\pm 4,597$

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10, 4.11 e 4.12 são referentes à seção de testes com a presença do direcionador proposto por Chong et al., 2013, para posições de 0° e 45°.

Tabela 4.9–Medidas da rotação da turbina com a presença do Direcionador para posição 0°.

Velocidade do Vento (m/s)	1	2	3	4	5	Média (RPM)	Incerteza (Δ RPM)
9 m/s	647	642	651	654	641	647	$\pm 0,726$
11 m/s	884	887	885	878	871	881	$\pm 0,987$

Tabela 4.10–Medidas da rotação da turbina com a presença do Direcionador para posição 45°.

Velocidade do Vento (m/s)	1	2	3	4	5	Média (RPM)	Incerteza (Δ RPM)
9 m/s	615	618	618	625	628	621	$\pm 0,696$
11 m/s	849	848	853	857	858	853	$\pm 0,956$

Tabela 4.11–Tensão medida no gerador elétrico com a presença do Direcionador para posição 0°.

Velocidade do Vento (m/s)	1	2	3	4	5	Média (mV)	Incerteza (Δ mV)
9 m/s	546	538	544	540	542	542	$\pm 3,658$
11 m/s	708	709	714	720	719	714	$\pm 4,812$

Tabela 4.12–Tensão medida no gerador elétrico com a presença do Direcionador para posição 45°.

Velocidade do Vento (m/s)	1	2	3	4	5	Média (mV)	Incerteza (Δ mV)
9 m/s	504	508	512	509	502	507	$\pm 3,423$
11 m/s	695	697	691	687	685	691	$\pm 4,658$

Nas Figuras 4.3, e 4.4, são representados, respectivamente, em forma de gráficos, a variação da rotação da turbina e da tensão medida no gerador elétrico em função da velocidade do vento incidente, sendo mostrado nos gráficos os dados levantados para a os testes da turbina sem e com a presença do direcionador – Modelo proposto por Chong et al.,

2013. Os dados nos gráficos apresentados são tomados a partir das Tab. 4.9 e 4.10, 4.11 e 4.12.

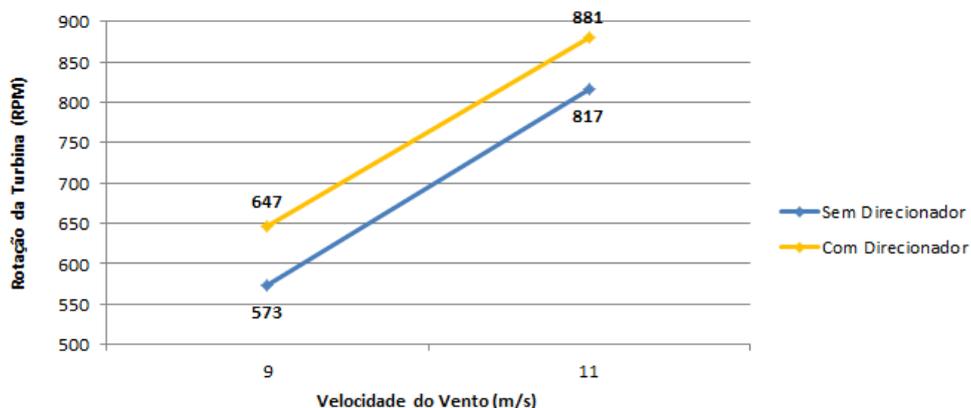


Figura 4.3 – Rotação da turbina em função da velocidade do vento incidente. Resultados para turbina sem e com a presença do Direcionador - Direcionador proposto por Chong et al., 2013 (0°).

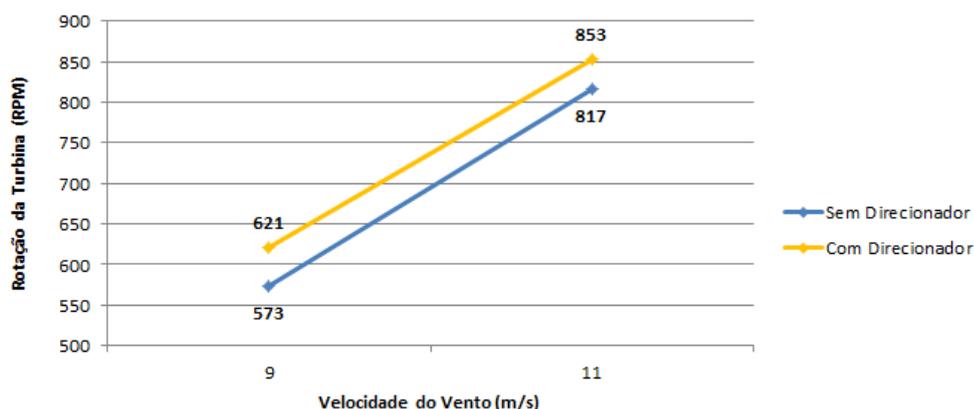


Figura 4.4 – Rotação da turbina em função da Velocidade do Vento Incidente. Resultados para turbina sem e com a presença do Direcionador - Direcionador proposto por Chong et al., 2013 (45°).

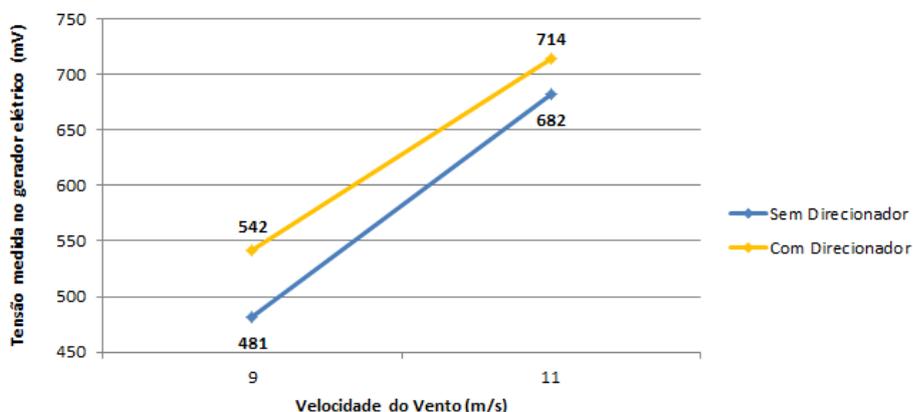


Figura 4.5 – Tensão medida no gerador elétrico em função da velocidade do vento incidente. Resultados para turbina sem e com a presença do Direcionador – Direcionador proposto por Chong et al., 2013 (0°).

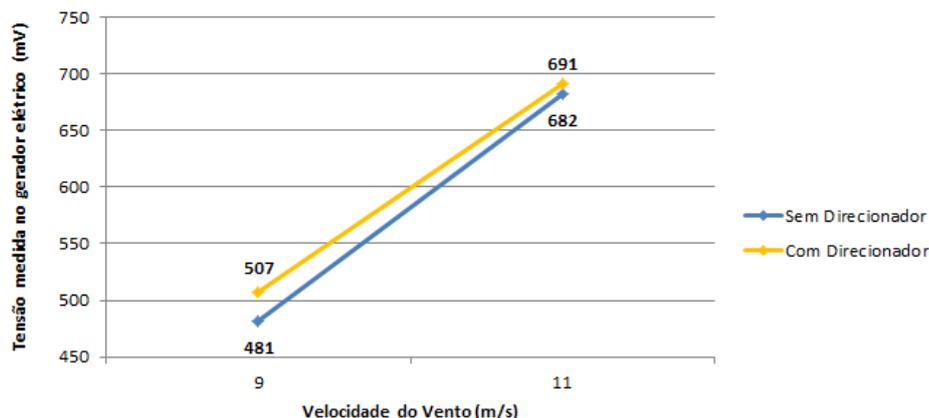


Figura 4.6 – Tensão medida no gerador elétrico em função da velocidade do vento incidente. Resultados para turbina sem e com a presença do Direcionador – Direcionador proposto por Chong et al., 2013 (45°).

Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 foram realizadas algumas comparações entre os resultados obtidos de forma a tornar mais claras as variações obtidas para cada dia de testes e para cada modelo proposto.

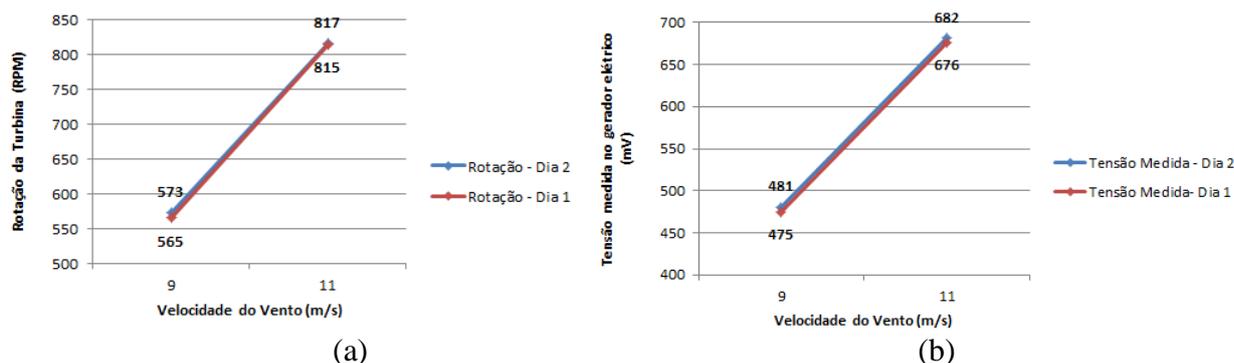


Figura 4.7 – Comparação entre a variação da (a) Rotação e (b) Tensão Medida do teste da turbina sem o direcionador para os dois dias de teste.

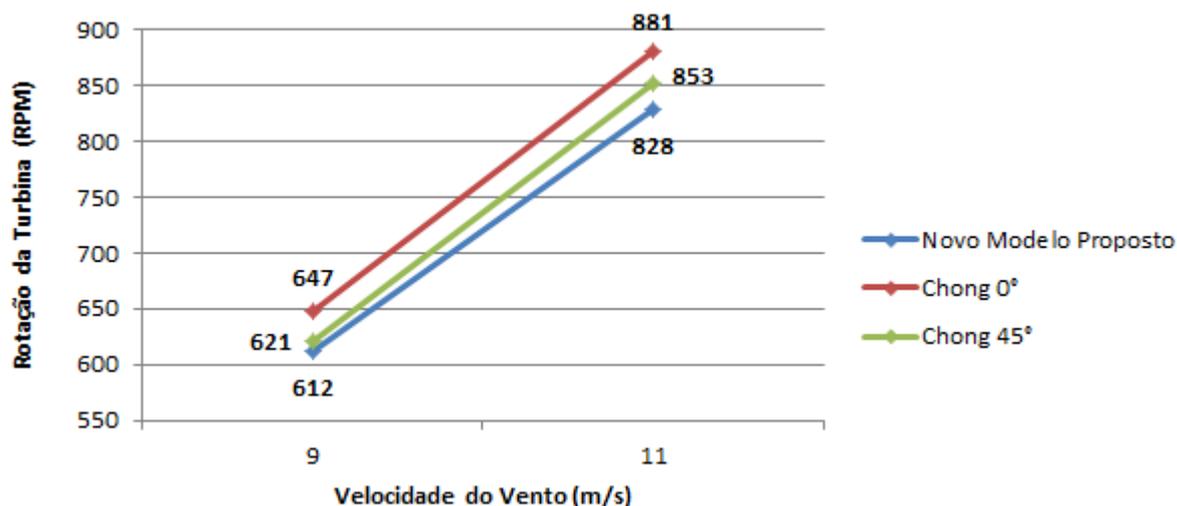


Figura 4.8 – Comparação entre as Rotações da turbina em função da velocidade do vento incidente. Resultados obtidos com Direcionador proposto pelo presente trabalho, com Direcionador proposto por Chong et al., 2013 a 0 e 45°.

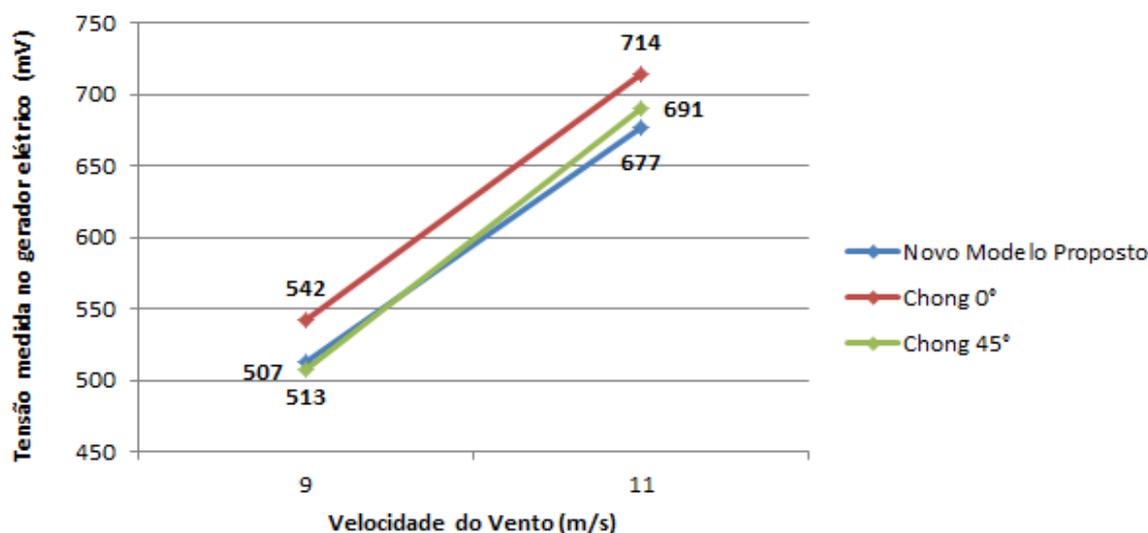


Figura 4.9– Comparação entre as Tensões Geradas pela turbina em função da velocidade do vento incidente. Resultados obtidos com Direcionador proposto pelo presente trabalho, com Direcionador proposto por Chong et al., 2013 a 0 e 45°.

Com uma análise dos gráficos é possível notar que a utilização de qualquer um dos modelos propostos fornece ganhos à turbina, tanto de velocidade rotacional quanto tensão medida no gerador elétrico, comprovando assim que há vantagens na utilização dos direcionadores acoplados às turbinas, oferecendo melhores condições de operação quando as mesmas são instaladas próximas a áreas urbanas.

Embora no início de todos os testes tenha sido necessária a aplicação de uma rotação para que a turbina iniciasse seu movimento, já que a partida não ocorreu espontaneamente, foi possível notar uma maior facilidade para o arranque com a utilização dos direcionadores, mostrando que a integração entre turbina eólica e qualquer um dos direcionadores de fluxo de ar facilita o início da rotação assim como previsto na literatura. É interessante lembrar que mesmo em aplicações reais as turbinas eólicas do tipo Darrieus apresentam problemas para início da rotação, sendo que para solução desse problema é utilizado um rotor Savonius em conjunto com o sistema.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como propósito apresentar uma alteração para a geometria de um direcionador de fluxo de ar já desenvolvido por outros pesquisadores com intuito de se obter uma melhor performance para turbina eólica integrada ao topo de uma edificação urbana. No entanto, nem todos os resultados se mostraram de acordo com o esperado.

Contudo, comprovaram-se algumas afirmações encontradas na literatura. Com a utilização do direcionador, embora todas as partidas tenham sido forçadas, foi possível perceber a maior facilidade para início do movimento da turbina eólica. Essa dificuldade para o início do movimento da turbina pode ser explicada se for levado em consideração que os materiais utilizados para a confecção da turbina deste experimento eram de menor qualidade e que devido a esse motivo o atrito entre as partes móveis (eixo e mancais rolamentados) era maior.

Também foi possível comprovar que o direcionador de fato melhora a eficiência da turbina. A literatura mostra uma melhora de performance muito maior do que a encontrada no presente trabalho, mesmo para o direcionador construído com base nas dimensões ditadas pelo experimento de Chong et al., 2013. Acredita-se que o motivo dessa diferença encontrada

possa ser atribuído novamente aos materiais utilizados para a confecção do protótipo da turbina, que por serem de menor qualidade e dimensões, não apresentaram o funcionamento esperado.

Outra conclusão interessante que se pode chegar é que a diferença de performance para a turbina com e sem direcionador, utilizando qualquer um dos protótipos, diminui com o aumento da velocidade do vento incidente. Tendo em vista que os experimentos realizados por Chong et al., 2013 foram feitos a velocidades mais baixas do que os testes realizados para este trabalho, é possível que essa queda de performance com a utilização do direcionador não tenha sido notada. Um possível motivo para esse efeito seria que com o aumento da velocidade do escoamento de ar a recirculação de ar dentro do direcionador também aumente, causando assim uma diminuição da performance da turbina quase equivalente à melhoria que o direcionador proporciona. Outro possível motivo poderia ser as perdas que o eixo da turbina apresentou durante os testes, pois era visível a falta de rigidez do mesmo com o aumento da velocidade do ar incidente, o que pode interferir diretamente nos resultados obtidos. O aumento da energia repassado através do vento incidente era consumido devido ao eixo ser construído de material flexível.

Os resultados para a disposição do modelo proposto por Chong et al., 2013 encontrados no túnel de vento também mostrou outra variação interessante quando são comparados com os resultados encontrados na por Chong et al., 2013. Nos resultados apresentados por Chong et al., 2013, independente do ângulo utilizado, não há variação de desempenho, enquanto que nos resultados acima apresentados, com uma variação de 45°, chega-se até uma diferença de 28 rpm e 29 mV. São valores pequenos, mas relevantes quando se leva em conta que esses são aproximadamente os valores das diferenças de performances entre o modelo apresentado Chong et al., 2013 e o modelo proposto no presente trabalho.

No segundo dia de testes os resultados da turbina sem a presença do direcionador foram melhores. Como motivo dessa variação pode ser indicado a variação das condições meteorológicas, pois o ar mais frio, pode aumentar a eficiência da turbina assim como mostra a Equação 2.1.

Outro possível motivo para essas pequenas diferenças de resultado poderia ser o fato de que os testes foram realizados com lubrificação do eixo diferente, e também com mínimas alterações na posição do eixo, já que para posicionamento do direcionador foi preciso retirar e reposicionar a ponte responsável por apoiar a parte superior do eixo da turbina eólica no topo da edificação.

Como sugestão de trabalhos futuros ressalta-se a necessidade da construção de protótipos com materiais mais apropriados que os utilizados nesse trabalho. Começando com o desenvolvimento de um método que não necessite de interação com o eixo da turbina para testes com e sem direcionador. Também seria interessante a utilização de um eixo mais rígido para evitar as perdas inerentes no mesmo. Para o caso da turbina ser construída com materiais de melhor qualidade, de forma que o atrito entre as partes seja menor, o experimento pode ser testado em velocidades inferiores para verificar se haveria um aumento da performance, assim como no experimento realizado por Chong et al., 2013.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica. **A Perspectiva de Futuro da Energia Eólica**. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/artigos/118-a-perspectiva-de-futuro-da-energia-e%C3%B3lica.html>>. Acesso em: 05 abr. 2015.

ABEEólica. **As normas técnicas obrigatórias para os aerogeradores**. Disponível em: <<http://portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/1851-as-normas-t%C3%A9cnicas-obrigat%C3%B3rias-para-os-aerogeradores.html>>. Acesso: 15 abr. 2015.

CCEE. Boletim das Usinas Eólicas. Número 012 – Janeiro/2014.

Chong WT, Kong YY, Tan LL. **Techno-economic analysis of a wind–solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application.**

Intellectual Property Corporation of Malaysia; 2011.

Chong, W.T.; **The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbinewith the omni-direction-guide-vane.** Intellectual Property Corporation of Malaysia; 2013.

Eriksson, S. **Evaluation of different turbine concepts for wind power.** Swedish Centre for Renewable Electric Energy Conversion, Division for Electricity and Lightning Research; 2006.

Garré S. et al. **Experimental Performace Evaluation of a Small Wind Turbine Confectioned in Prototyping 3D – Phase I.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

Gelatti, F. **Efeito da força do vento edificações de concreto armado.** Universidade do Vale do Itajaí. Itajaí, 2009.

Homicz, G. F., **Numerical Simulation of VAWT Stochastic Aerodynamic Loads Produced by Atmospheric Turbulence VAWT-SAL Code,** Sandia National Laboratories, SAMD91-1124 (1991).

Knight J. **Urban wind power: breezing into town.** Nature 2004;430:12e3.

LOREDO-SOUZA, Acir Mércio et al. **Estudo comparativo sobre a ação e efeito do vento em edifício altos de concreto armado.** In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6., 2006, São Paulo. SIMP0163. São Paulo: USP, 2006. p. 1226 - 1241. CD-ROM.

MMA. **Energia Eólica.** Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica>>. Acesso: 10 abr. 2015.

MME. **Balanco Energético Nacional.** Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores>> Acesso em: 05 abr. 2015

Müller G, Jentsch MF, Stoddart E. **Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings.** Renewable Energy 2009;34:1407e12.

Peacock AD, Jenkins D, Ahadzi M, Berry A, Turan S. **Micro wind turbines in the UK domestic sector.** Energy and Buildings 2008;40:1324e33.

SILVA, G.B.O. **Desenvolvimento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical.** Brasil, 2011.

TANGLER, J. L. E SOMERS, D. M., **“Nrel airfoil families for hawts”**, NREL, 1995.

TRABALHOS FEITOS. **Tubo de Venturi.** Disponível em:< <http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Tubo-De-Venturi/88307.html>>. Acesso: 29 Maio 2015.

7. APÊNDICES

Apêndice A – ANÁLISE DE INCERTEZAS

O erro em uma medição consiste na diferença entre o valor real e o medido. Neste trabalho serão analisadas as incertezas de medição, que são os valores possíveis dos erros, pois os valores medidos não são previamente conhecidos. Segundo Moffat, 1988, a incerteza de um resultado pode ser obtida a partir da equação a seguir:

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

onde $R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)$ é o resultado em análise e δX_i é a incerteza da variável X_i .

A incerteza na leitura de uma medição depende da resolução da escala do respectivo instrumento envolvido. Assim, são listadas na Tab. A.1 as principais resoluções das escalas dos instrumentos utilizados neste trabalho.

Tabela A.1 - Resolução das escalas dos instrumentos utilizados no trabalho.

Instrumento	Resolução
Tacômetro	$\pm 0,05\% + 1$ díg.
Multímetro	$\pm 0,3\% + 10$ díg.

O valor da incerteza, para os resultados dos RPM's medidos, estão relacionados à precisão do instrumento utilizado para medição. O tacômetro utilizado possui uma incerteza, segundo, fabricante deste equipamento de $\pm 0,05\%$ da leitura + 1 dígitos. As incertezas para cada medição de rotação por minuto, com e sem os protótipos, são apresentadas nas Tabelas 4.2; 4.4; 4.7; 4.9; 4.10 e as mesmas foram obtidas através da Eq. (A.1).

Para as incertezas da leitura de tensão no gerador, foi utilizado o Multímetro com incerteza indicada pelo fabricante igual a $0,3\%$ da leitura + 10 dígitos. As incertezas para cada medição de tensão gerada no gerador, com e sem os protótipos, são apresentadas nas Tabelas 4.3; 4.5; 4.8; 4.11; 4.12 e as mesmas foram obtidas também através da Eq. (A.1).

8. ANEXOS

ANEXO A – datasheet (rf-300ca-09550)

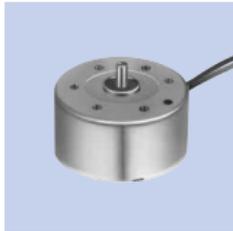


RF-300CA

OUTPUT: APPROX 0.1W-0.5W

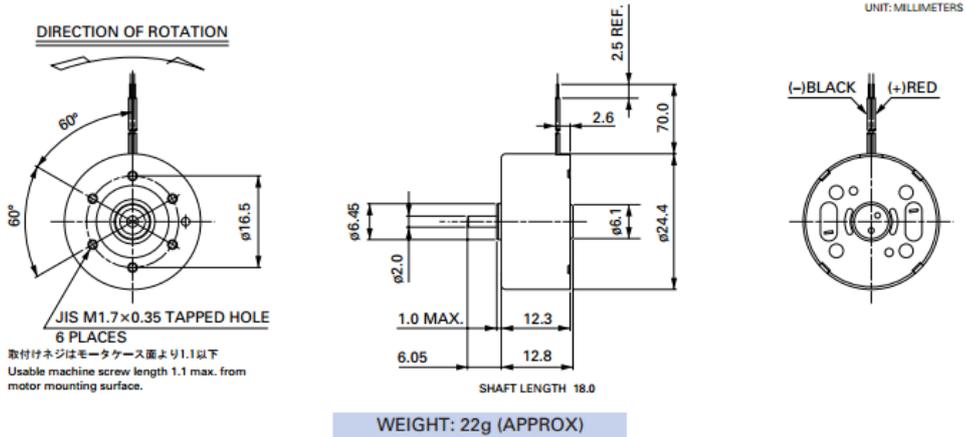
Precious metal-brush motors

Typical Applications Audio and Visual Equipments : CD Player / Headphone Stereo / Car CD Player / DVD Player
Office Automation Equipments : CD/DVD-ROM Drive

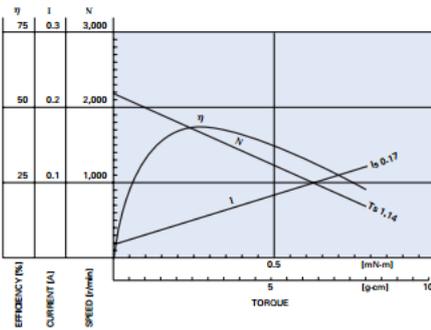


MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL			
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE	OUTPUT	TORQUE	CURRENT		
			r/min	A	r/min	A	mN·m	g·cm	W	mN·m	g·cm	A
RF-300CA-11440	0.7 - 5.0	2V CONSTANT	2200	0.018	1660	0.055	0.28	2.9	0.049	1.14	12	0.17
RF-300CA-11400	1.2 - 6.0	3V CONSTANT	3700	0.018	2970	0.073	0.38	3.8	0.12	1.91	20	0.30
RF-300CA-09550	1 - 6	3V CONSTANT	2700	0.012	2100	0.042	0.27	2.8	0.060	1.24	13	0.15
RF-300CA-14270	0.5 - 4.0	1.9V CONSTANT	3500	0.032	2740	0.12	0.38	3.9	0.11	1.76	18	0.42

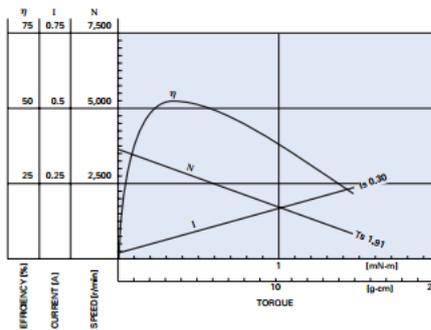
*High temperature specification motor is also available.
*Also available with terminals (without leadwires).



RF-300CA-11440 2.0V



RF-300CA-11400 3.0V



ANEXO B – TACÔMETRO DIGITAL MINIPA MDT – 2244B

O manual de instruções pode ser acessado em: <
<http://www.minipa.com.br/Content/Manuais/MDT-2244B-1103-BR-EN-ES.pdf>>

a) Especificações Gerais

- Display: LCD 5 dígitos com leitura máxima de 99999.
- Indicação de Bateria Fraca: O símbolo será mostrado quando a tensão da bateria cair abaixo da tensão de operação.
- Taxa de Amostragem: 0,5 segundo (acima de 120RPM).
- Seleção de Faixa: Automática.
- Memória: Valor máximo, mínimo e última leitura.
- Base de Tempo: Cristal de Quartzo.
- Alimentação: 3 baterias AAA de 1.5V.
- Consumo: Aprox. 50mA.
- Ambiente de Operação: 0°C a 50°C com umidade relativa < 80%.
- Dimensões: 184(A) x 76(L) x 30(P)mm.
- Peso: 180g (incluindo bateria).

b) Especificações Elétricas

- Faixa: 2,5 a 99999 RPM
- Resolução: 0,1 RPM (2,5 a 999,9 RPM) 1 RPM (acima de 1000 RPM)
- Precisão: $\pm (0,05\% \text{Leit.} + 1 \text{Díg.})$
- Distância de Detecção: 50 a 250mm

Anexo C - Multímetro Digital de Bancada POL-79C

Especificações Técnicas:

- Display: LCD 4 7/8 Dígitos (80000 contagens), com iluminação e barra gráfica
 - Taxa de Amostragem: 4 vezes por segundo
 - Indicação de Polaridade: Automática
 - Indicação de Sobrefaixa: 1 é mostrado
 - True RMS AC / AC+DC (Precisão válida apenas para True RMS AC)
 - Data Hold, Máx. Mín. Relativo e AVG (Média)
 - Mudança de Faixa: Manual e Automática
 - Altitude Operação: Até 2000m
 - Grau de Poluição: 2
 - Temperatura de Operação: 0°C a 40°C, RH < 90%
 - Temperatura de Armazenamento: -20°C a 60°C, RH < 75%
 - Alimentação: 110 / 220 V AC (50Hz/60Hz)
 - Dimensões: 97(A) x 213(L) x 247(P)mm
 - Peso: Aprox. 1.3kg
- TENSÃO DC: 80mV, 800mV, 8V, 80V, 800V, 1000V
- Precisão: 80mV \pm (0.3%+10D), 800mV~80V \pm (0.05%+5D), 800V~1000V \pm (0.05%+10D)
 - Resolução: 1 μ V, 10 μ V, 100 μ V, 1mV, 10mV, 100mV
 - Impedância de Entrada: 80mV~800mV > 1000M Ohms, 8V~1000V- 10M Ohms
 - Proteção de Sobrecarga: 1000V DC