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

Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potência convertida de uma turbina eólica de eixo vertical.

por

Henrique Tasca Tedesco

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

Porto Alegre, Novembro de 2015

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

Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potência convertida de uma turbina eólica de eixo vertical.

por

Henrique Tasca Tedesco

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. Drª Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

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

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Paulo Otto Beyer

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 25 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais, Clarice e Jandir Tedesco, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Mãe, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. Pai, seu cuidado e dedicação foi que deram suporte e a esperança em toda minha trajetória.

À minha família, tios e tias, avôs e avós, primos e primas, por sua capacidade de acreditar em mim. Em especial, Danilo e Dirce Ughi e Nilce Tasca.

À Lara M. Fontana, pela paciência durante os momentos de tensão e de empenho, pelas horas acordada ao meu lado para a conclusão desse trabalho, palavras de incentivo e preocupação.

À todos meus amigos, que me apoiaram e alegraram meus dias. Em destaque, Pedro T. Steger, Vitor Guilherme S. da Costa, Guilherme D. Rampon, Paulo Vitor Lira e William C. Radünz.

Ao meu orientador Alexandre Vagtinski de Paula, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS (LMF) pela disponibilização do túnel aerodinâmico para as medições e ao funcionário João Batista da Rosa pelo apoio técnico.

Ao bolsista de iniciação científica Alexandre Fiabani, pela dedicação de seu tempo, principalmente no auxílio da construção do protótipo do aerogerador.

A universidade Federal do Rio Grande do Sul, seu corpo docente, direção e administração por oportunizarem todo o aprendizado, confiança e ética durante a graduação.

E a todos que direta ou indiretamente da minha formação, o meu muito obrigado!

Tedesco, H. T. **Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potência convertida de uma turbina eólica de eixo vertical.** 2015. 27 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

A utilização da energia em consonância com o crescimento econômico de um país é um dos temas de maior relevância para um desenvolvimento sustentável da sociedade. Atualmente, o mundo depende do carvão, petróleo e gás natural para sua geração. Porém, o esgotamento dessas fontes não renováveis juntamente com as alterações climáticas tornam-se grandes preocupações para todos os países. Portanto, os recursos energéticos alternativos, como a energia eólica, tem atraído a atenção de diversos investidores de energia sustentável e verde. A geração de energia local renovável esta se tornando mais generalizada como é o caso dos painéis fotovoltaicos, micro-cogeração (produção combinada de calor e eletricidade) e a microeólica. Este conceito se baseia em extrair energia a partir de fontes renováveis perto da área povoada onde ela será necessária. O potêncial eólico em ambientes urbanos possue vantagens frente à forma que hoje se explora esse tipo de energia. Vantagens estas que podem ser citadas como a menor perda de energia devido às longas linhas de transmissão, gastos com transporte e logística de equipamentos entre outros. As turbinas comumentes utilizadas em parques eólicos, as turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), não são propícias para a utilização em ambientes urbanos devido a diferença do tipo de ventos ou pelas grandes dimensões da turbina. Entretanto, podem-se utilizar turbinas eólicas com outras características, como as turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV), as quais apresentam um melhor desempenho nas condições de vento encontradas em cidades. Porém, 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 que será estudado nesse trabalho trata-se de um direcionador de escoamento, o qual baseia seu funcionamento no aumento da velocidade do escoamento de ar entregue à turbina eólica, juntamente com a diminuição da área de torque negativo das pás da turbina. O presente trabalho estuda à eficiência de diferentes direcionadores de escoamento para uma turbina de energia eólica vertival (TEEV) de 5 pás do tipo H-Darrieus em busca de otimizar e comparar resultados dos mesmos feitos por Chong *et al.*, 2013. Para a confecção dos modelos que serão ensaiados, as escalas serão reduzidas devido aos custos inerentes de fabricação e às dimensões limitantes do túnel de vento utilizado nos ensaios. Os experimentos serão realizados em um túnel de vento de circuito aberto onde medições de rotação e tensão gerada pela TEEV serão tomadas a partir de um sistema Arduino onde a medição de potência é convertida em um banco de cargas.

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

Tedesco, H. T. **Comparative study of different flow drivers in converted power optimization into a vertical axis wind turbine**. 2015. 27 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

The economic growth of a country depends on its energy demands and thus there is a need to get it. Currently, the world relies on coal, oil and natural gas to its generation. However, the depletion of these non-renewable sources along with climate change becomes major concerns for all countries. Therefore, alternative energy sources such as wind power, has attracted the attention of several investors in a sustainable and green energy. The site renewable energy generation is becoming more widespread as in the case of photovoltaic panels, micro-cogeneration (combined heat and electricity) and micro Eolic. This concept is based on extracting energy from renewable sources close to the populated area where it is needed. The wind potential in urban environments possesses advantages over the way that today explores this type of energy. These advantages can be cited as the lower power loss due to long transmission lines, spending on transport and logistics equipment among others. The usual turbines used in wind farms, wind turbines horizontal axis (TEEH), are not appropriated for use in urban environments because of the wind variability or by the large size of the turbine. However, they may be used to other wind turbine features, such as vertical axis wind turbine (TEEV), which exhibit enhanced performance in windy conditions found in cities. However, 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 will be studied in this work it is a flow director, which bases its operation on increasing the speed of the air flow delivered to the wind turbine along with the decrease of the negative torque area of the turbine blades. This paper will examine the effectiveness of different flow drivers for a vertical direction wind turbine (TEEV) of 5 blades of the H-Darrieus type seeking to optimize and compare results thereof made by Chong *et al.*, 2013. To prepare the models to be tested, the scales will be reduced due to inherent manufacturing costs and limiting dimensions of the wind tunnel used in the trials. The experiments are performed in a open-circuit wind tunnel in which rotation TEEVmeasurements and the generated voltage are taken from a Arduino system where the power measurement is converted into a bank loads.

KEYWORDS: flow drivers, vertical axis wind turbine, wind energy.

ÍNDICE

Pág.

1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 2
3.1. Caracterização do potêncial eólico brasileiro 2
3.1.1 Geração distribuída 2
3.2 Turbinas eólicas de eixo vertical 2
3.2.1 Microturbinas eólicas 3
3.3 Energia Eólica 3
3.3.1 Determinação do potencial eólico 3
3.3.2 Energia máxima teórica 4
3.4 Direcionador de escoamento 5
4. METODOLOGIA 5
4.1 Normas para levantamento da curva de potência 5
4.2 Túnel de vento 5
4.3 Construção do protótipo do direcionador de escoamento 6
4.4 Construção da turbina eólica do tipo H-Darrieus 7
4.5 Componentes utilizados 8
4.6. Curva de potência da turbina de eixo vertical H-Darrieus 9
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 10
6. CONCLUSÃO 14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 14
APÊNDICE I – ANÁLISE DE INCERTEZAS 16
APÊNDICE II – DADOS NECESSÁRIOS PARA EXPRESSAR A CURVA DE POTÊNCIA. 17
APÊNDICE III – DESENHOS TÉCNICOS. 18
ANEXO I – TABELA CONTENDO ALGUMAS MEDIDAS ADOTADAS DA NORMA IEC-6140-12-1. 19
ANEXO II – DATASHEET SENSOR DE CORRENTE SCT-013-000 E DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA, RESPECTIVAMENTE 20
ANEXO III – TACÔMETRO DIGITAL MINIPA MDT – 2244B 20

1. INTRODUÇÃO

A utilização da energia em consonância com o desenvolvimento sustentável da sociedade é um dos temas de maior relevância na atualidade, assim como as formas para minimizar os impactos ambientais e sociais causados por tradicionais fontes de energia, constituídas em sua maioria por combustíveis fósseis. Ao mesmo tempo, observa-se o apelo social pelo uso de energias renováveis e sustentáveis. Esses fatos, têm levado governantes e especialistas de todo o mundo a criar e adotar políticas públicas voltadas à promoção, desenvolvimento e utilização das chama das "energias verdes" [Goldemberg, 1998; Seifried, 2010].

A geração de energia eólica em centros urbanos é uma ideia atrativa. As cidades possuem um grande potêncial de geração de energia eólica junto com uma grande demanda. As características do vento urbano estão cade vez mais sendo estudados pela comunidade acadêmica [Aneel, 2009], e já existem empresas que empregam turbinas eólicas em prédios.

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]. A produção independente de energia é classificada como geração distribuída (GD), caracterizada como a produção descentralizada de energia, conectada ao longo da rede elétrica de distribuição e próxima à carga (consumo) [Dugan, 2003]. Neste sentido, a utilização de aerogeradores de pequeno porte (APP), de 1 a 100 kW, constitui uma interessante alternativa como fonte de energia limpa e renovável, produzindo energia de forma descentralizada e de baixo custo [Gippe, 1999].

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 arranque, possui bom comportamento de partida, simplicidade na fabricação, e diferentemente das turbinas de eixo horizontal, consegue captar ventos a partir de qualquer direção [Peacock *et al*., 2008; Müller *et al*., 2009].

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 arranque 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. Assim, este trabalho tem como intuito da otimização e comparação dos resultados obtidos por Chong *et al., 2013,* em relação a eficiência de diferentes direcionadores de escoamento para uma turbina de energia eólica vertical (TEEV) de 5 pás do tipo H-Darrieus.

2. OBJETIVOS

O trabalho apresenta um estudo da curva de potência de uma turbina eólica de eixo vertical de 5 pás do tipo H-Darrieus em escala reduzida com diferentes direcionadores de escoamento visando comparar os resultados dos mesmos com à literatura [Chong *et al.*, 2013] e o desenvolvimento de um novo protótipo de direcionador de escoamento com o intuito de otimizar a potência de saída em relação ao modelo comparado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Caracterização do potêncial eólico brasileiro

A participação atual da energia eólica na matriz elétrica brasileira corresponde a potência instalada de 1886 MW, o que representa 1,56% da capacidade de geração elétrica do País. Considerando que a produção máxima de energia eólica anual do Brasil é de aproximadamente 143,4 GW a 50 metros de altura [Amarante, 2001] e que atualmente o aproveitamento encontra-se na ordem de 1,89 GW, ou seja, 1,32% de utilização dos recursos disponíveis, o País tem um vasto potencial a ser explorado.

A geração de energia descentralizados de pequeno porte interligados à rede elétrica ainda não apresentam destaque no País. Contudo, estima-se que esses sistemas ganhem espaço em comunidades, residências urbanas, propriedades rurais, empresas e indústrias, promovendo a autoprodução de energia total ou parcial e, por vezes, a criação de créditos de energia elétrica ativa (kWh), no caso de geração excedente, contribuindo também para o abastecimento do sistema elétrico [Aneel, 2011].

3.1.1 Geração distribuída

Segundo o Art. 14 do Decreto n^{o} 5163, de 30 de julho de 2004, a geração distribuída caracteriza-se no País como a energia gerada próxima à carga, conectada diretamente ao sistema elétrico de distribuição e oriunda de qualquer fonte de energia.

Em relação à geração distribuída de pequeno porte (até 1 MW), o País passou a adotar, em 17 de abril de 2012, a Resolução Normativa n^{o} 482, que estabelece as condições gerais para o acesso a micro e minigeração distribuída nas redes de distribuição, bem como institui a política pública do Sistema de Compensação de Energia Elétrica [Aneel, 2012]. Na minigeração distribuída, o consumidor não é mais tratado somente como consumidor, mas sim como consumidor-gerador, uma vez que produz sua própria energia, suprindo parcialmente ou totalmente suas necessidades, e, no caso de geração excedente, pode gerar créditos de energia através do Sistema de Compensação de Energia Elétrica [Aneel, 2012].

Quanto aos pontos positivos da GD de pequeno porte, destacam-se: a implantação rápida dos sistemas; menores perdas, visto que a energia é gerada próxima ao consumo, não necessitando ser transmitida a longas distâncias; menor impacto ambiental; diversificação da matriz elétrica; melhoria dos níveis de tensão no período de pico; geração de serviços auxilares; e postergação no investimento de expansão dos sistemas de distribuição [Aneel, 2011].

3.2 Turbinas eólicas de eixo vertical

As turbinas eólicas podem ser classificadas como turbinas de eixo vertical e turbinas de eixo horizontal, representadas na Fig 3.1. As Turbinas de eixo vertical são caracterizadas, como o nome indica, pelo seu eixo de rotação se encontrar disposto na vertical, com as pás em torno desse eixo.

O princípio base destas turbinas é o mesmo que os das turbinas hídricas modernas, isto é, o escoamento é paralelo ao eixo de rotação das pás da turbina [Elliott *et al*., 2014]. Este tipo de turbina apresenta a vantagem de não necessitar de mecanismos de acompanhamento para variações da direcção do vento, o que torna mais reduzidos os esforços devido às forças de Coriolis, que se traduz na simplicidade da concepção. Outra vantagem é a possibilidade de instalação junto ao solo de todo o equipamento de conversão de energia mecânica.

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.

As turbinas do tipo Darrieus, são um dos exemplos mais famosos de turbinas de eixo vertical. São movidas por forças de sustentação (*lift*) e por forças de arrasto (*drag*), e podem ser utilizadas junto às turbinas Savonius denominada também de rotor tipo S de baixa rotação e alto torque a qual fornecem o torque de partida [Garcia *et al*., 2006]. As principais desvantagens das turbinas Darrieus são: incapacidade de autoarranque, necessitando de meios exteriores de auxílio; necessidade de utilização de estrutura de suporte devido aos esforços dinâmicos com comportamento inerente e periódico.

(a) (b)

Figura 3.1: Turbinas eólicas: (a) *Exemplo de uma turbina de eixo vertical.* (b) *Exemplo de uma turbina de eixo horizontal à direita.*

3.2.1 Microturbinas eólicas

A dimensão de referência para as microturbinas é o diâmetro do seu rotor, que pode variar de alguns centímetros até sete metros de altura. As potências variam das centenas de Watts até os 5 kW. As microturbinas têm como principal objetivo complementar o sistema principal de energia de uma determinada instalação. Como em qualquer outra máquina, as características da microturbina são determinadas conforme o objetivo e as características do local a instalar, sejam estes em termos de utilização ou mesmo até a nível estético.

O principal obstáculo de investimento nas microturbinas está associado à incerteza de energia produzida devido à elevada variabilidade do vento em meio urbano, exigindo uma caracterização prévia do potencial eólico nas áreas construídas.

3.3 Energia Eólica

3.3.1 Determinação do potencial eólico

A energia eólica é gerada por meio de aerogeradores, nos quais usa a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento) captadada por hélices ligadas a um eixo que transmite o torque para um gerador elétrico. A quantidade de energia transferida é função da massa específica do ar, da área efetiva das pás (hélices) e da velocidade do ar [MMA, 2015]. A relação entre essas grandezas é dada por:

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

em que C_p é o coeficiente de potência, ρ é a massa específica do ar em (kg/m³), V_∞ é a velocidade do vento em (m/s), $P_{eólica}$ é a potência eólica teórica em (W) e A é a área perpendicular ao escoamento considerada em (m^2). Nota-se a importância de C_p ao cálculo por representar a eficiência da turbina, pois, relaciona a potência máxima teórica e a potência real.

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]. A massa específica do ar diminui com a altitude. De acordo com a atmosfera, 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 umidade relativa e da temperatura do ar cujos aumentos fazem diminuir ρ [Silva, 2011].

3.3.2 Energia máxima teórica

Os aerogeradores extraem energia ao bloquear a passagem do vento, gerando energia cinética na colisão entre as partículas. Para um aerogerador ser 100% eficiente precisaria bloquear toda a massa de ar que atravessa a área efetiva da turbina - mas nesse caso em vez de pás seria necessário uma massa sólida cobrindo 100% da área total da turbina, dessa forma, o rotor não rodaria e não converteria a energia cinética em mecânica. No outro extremo, se tivéssemos uma turbina com apenas uma pá, a maior parte do ar passaria pela turbina sem interação com a pá e, assim, sem expressiva variação de sua energia cinética [Betz. 2013].

Entre estes dois extremos existe um pico ou ponto máximo de rendimento, que é o limite de Betz. A energia máxima teória o que qualquer aerogerador pode extrair é de 0,59 (ou seja, não mais do que 59% da energia do vento pode ser extraída por um gerador eólico). Mas quando se juntam mais alguns requisitos de engenharia - principalmente perdas mecânicas e elétricas - os valores reais atingidos estão bastante abaixo do limite de Betz com valores entre os 40% para serem usados mesmo entre os mais bem desenhados aerogeradores. Um esquema das ineficiências de um gerador eólico esta representado na figura 3.2.

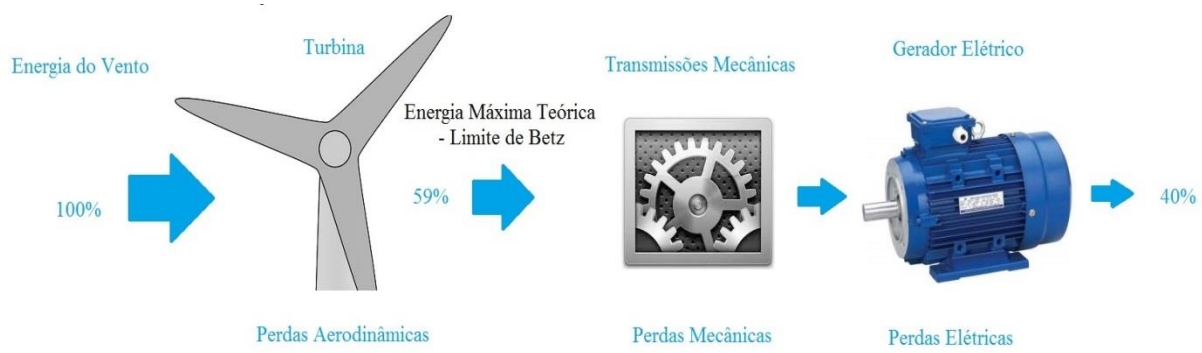


Figura 3.2: Representação da estimativa de perdas em um aerogerador eólico.

3.4 Direcionador de escoamento

O objetivo de um 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. Chong *et al*., 2013, demonstrou que este dispositivo é capaz de melhorar o desempenho das turbinas em termos da energia transmitida, velocidade angular, comportamento de auto acionamento e melhora nas questões que envolvem ruído. Na Tabela 3.1 é possível ver os resultados da utilização do direcionador integrado à turbina.

Tabela 3.1 – 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 mN.m	23,64 mN.m	2,1
Velocidade angular	77,4 rpm	144,4 rpm	1,87
Energia gerada	0,1252 W	0,4352 W	3,48

4. METODOLOGIA

4.1 Norma IEC para levantamento da curva de potência

A IEC (International Eletrotechnical Comission) apresenta normas para a padronização de projetos elétricos e eletrônicos. O presente trabalho utilizou como referência a norma IEC 61400-12-1, que refere-se à sistemas de geração de energia de aerogerados de pequeno porte, contudo, adaptadas para levantar a curva de potência num túnel de vento. O anexo I apresenta um resumo das recomendações apresentadas na IEC-61400-12-1 [IEC, 2011]. Parte das recomendações foram adotadas na presente metodologia.

4.2 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 [Fox, 2004].

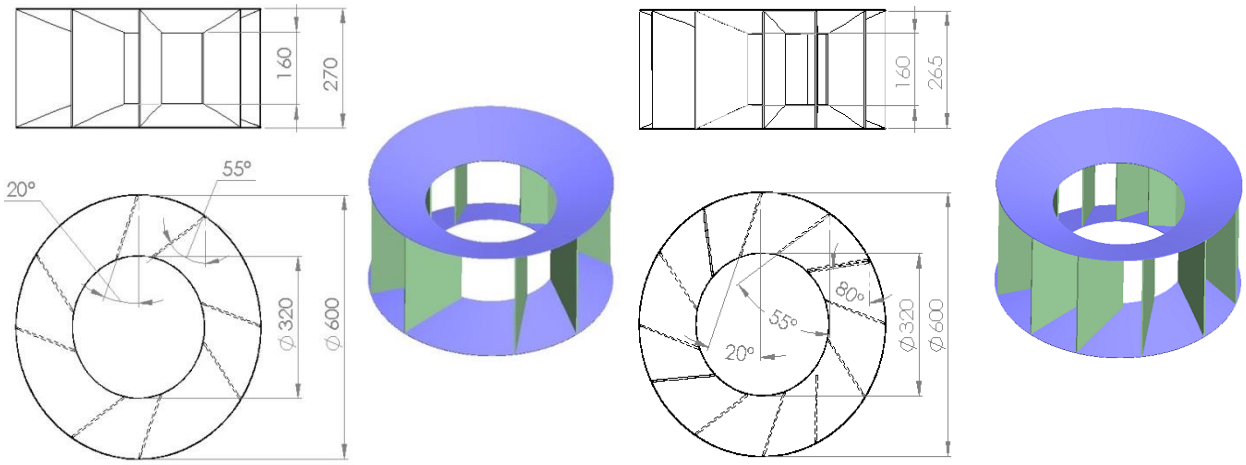
Os experimentos realizados durante o período de execução deste trabalho foram desenvolvidos no túnel de vento situado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS. O túnel de vento de circuito aberto, com uma seção de testes de 1 m de largura, 1 m de altura é equipado com um motor elétrico de 8 cv, 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 8 m/s, dependendo intrinsicamente 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.

4.3 Construção do protótipo do direcionador de escoamento

Para o presente trabalho foi necessário fazer uma redução de escala do modelo construído por Chong *et al*., 2013 devido aos altos custos inerentes ao processo de fabricação e também devido às limitações que encontra-se para a realização dos testes, pois, para a obtenção dos dados sem interferências a área do protótipo não pode bloquear 30% da área das seções de testes. A seção dos modelos testados no túnel de vento foi de aproximadamente 20% da seção do túnel de vento.

Na Figura 4.1 é possível verificar essas dimensões reduzida (fator de escala – 1/3), proporcionalmente, em comparação ao protótipo original construído por Chong *et al*., 2013. Observa-se também a diferença entre a angulação e número das pás direcionadoras de escoamento para o modelo da literatura.

A diferença de altura entre o diâmetro interno e o diâmetro externo do direcionador tem como propósito utilizar-se do efeito de Venturi, aumentando a velocidade do ar que será direcionado à turbina.



(a) (b)

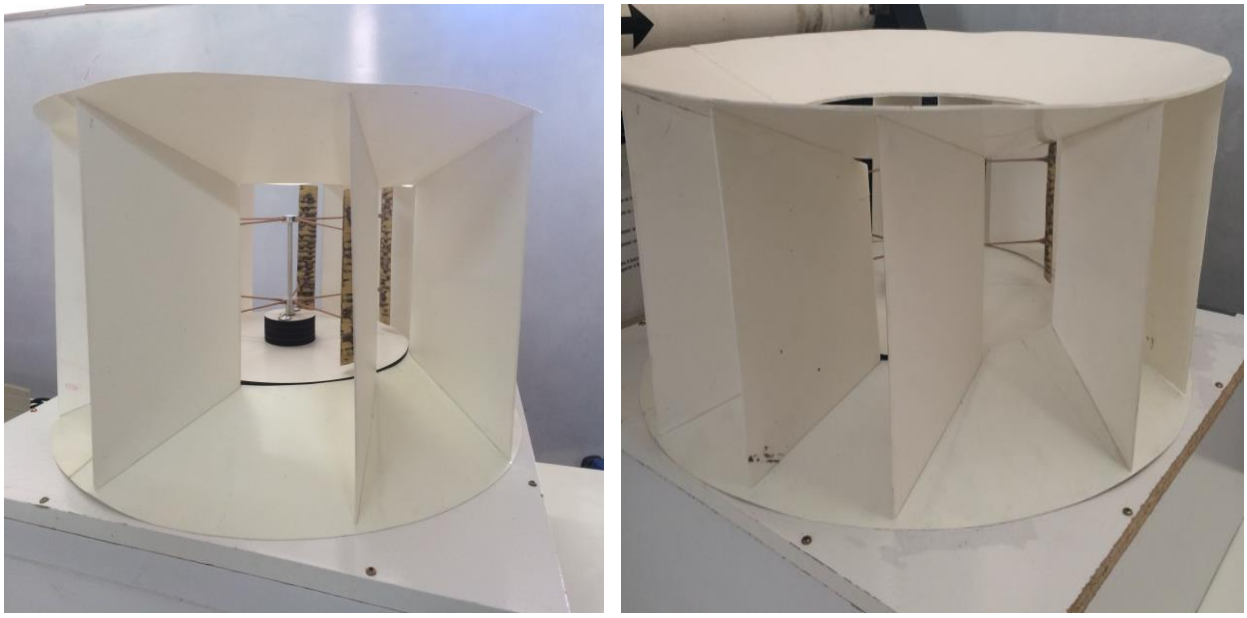
Figura 4.1: Vistas do modelo de Direcionador: (a) *Proposto por Chong et al., 2013 e* (b) *Presente trabalho.*

Essa variação proposta para os ângulos das pás do direcionador tem por objetivo diminuir a componente da força normal do ar que é desperdiçada no direcionador, tendo em vista que quanto menor o ângulo de ataque das pás (diferença entre a tangente do diâmetro maior e sua perpendicular), maior será a energia do vento transmita à turbina.

O aumento do número de pás propõe uma melhora da eficiência da turbina aumentando a área efetiva da turbina, visando também tornar o direcionar 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 modelo proposto, pelo fato de possuir mais pás, permite a entrada de ar 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.*, 2013.

Os dois protótipos são constituídos de isopor de alta densidade [poliestireno expandido – EPS] para a confecção das abas e das partes cônicas. Na Figura 4.2 é possível visualizar a montagem da turbina eólica com cada direcionador.



(a) (b)

Figura 4.2: Montagem da turbina eólica os dois modelos de direcionador. (a) *direcionador proposto na literatura.* (b) *direcionador proposto no presente trabalho.*

4.4 Construção da turbina eólica do tipo H-Darrieus

Como o intuito do trabalho é comparar e otimizar o modelo da literatura reproduziu-se a mesma turbina eólica proposto por Chong *et al*., 2013 e o mesmo perfil aerodinâmico das pás. Dessa forma, o modelo da turbina selecionado é o H-Darrieus e o perfil aerodinâmico das pás é o WORTMANN FX 63-137 AIRFOIL (Apêndice III – desenhos técnicos), com 70 mm de corda, e 150 mm de altura para as pás.

As pás foram confeccionas utilizando o processo de corte a laser de uma chapa de madeira balsa em vários pedaços com o formato do perfil aerodinâmico escolhido, após colou-os até a pá atingir a altura especificada. Optou-se por madeira balsa por ser um 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 consequentemente maior será potência gerada.

A turbina foi alocada no centro do suporte de madeira feito de MDF que apoia o sistema (figura 4.3), 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 por meio de um mancal de rolamento.

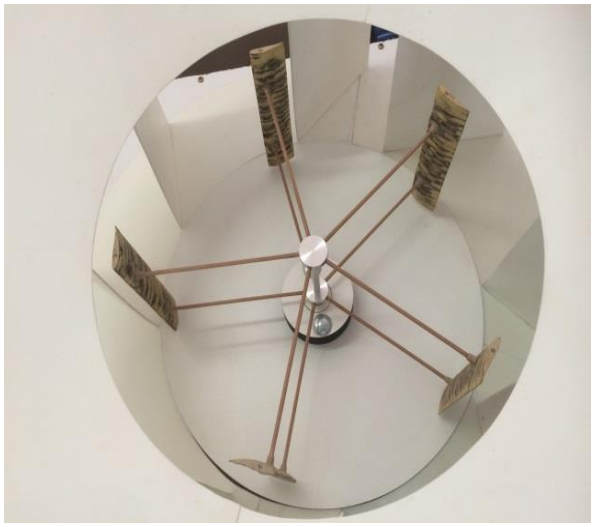


Figura 4.3: Vista superior da montagem final da turbina eólica.

4.5 Componentes utilizados

O presente trabalho teve como propósito apresentar uma alteração para a geometria de um direcionador já desenvolvido por outros pesquisadores com intuito de se obter uma melhor performance para turbina eólica integrada ao topo de uma edificação urbana.

Na metodologia se utiliza um sistema composto de um aerogerador; banco de baterias (12V) conforme especificado na norma IEC-61400-12-1; um banco de cargas resistivas configurável com potência máxima de 1 kW; um sistema Arduino; um tacômetro digital Minipa MDT-2244B para a leitura da velocidade rotacional da turbina (as especificações gerais, assim como o endereço eletrônico do manual deste aparelho podem ser encontradas no Anexo III); um gerador (marca Akasa), acoplado diretamente no eixo da turbina, de tensão contínua 12V e âmperagem máxima de 0,24A; um barômetro de Torricelli calibrado capaz de medir a pressão atmosférica (mmHg); e um tubo de pitot posicionado na montante do aerogerador para medir a velocidade do ar incidente na turbina. O *setup* de montagem está ilustrado na figura 4.4.

No sistema arduino são utilizados três sensores: sensor de Corrente (SCT-013-000); sensor de temperatura e umidade (DHT22); sensor de tensão (divisor de tensão resistivo). A taxa de aquisição de dados do microcontrolador é de 0,5 segundos. O banco de carga resistiva auxilia para redirecionar a energia gerada em excesso em vez de deixá-la fluir para a bateria. O datasheet dos sensores encontram-se no Anexo II.

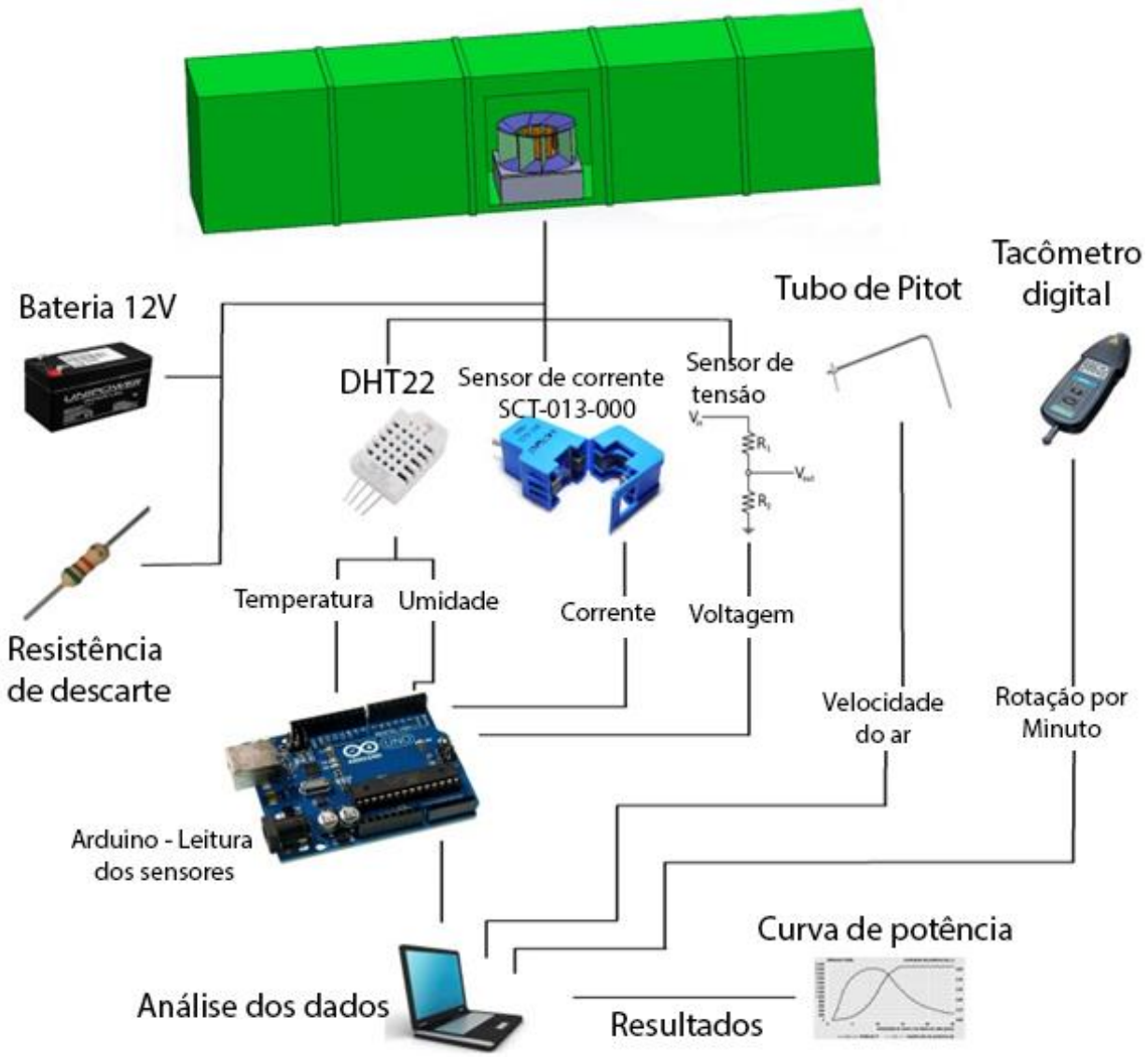


Figura 4.4: Esquema para aquisição dos dados e seus componentes.

4.6. Curva de potência da turbina de eixo vertical H-Darrieus

Sabe-se 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 com a presença do direcionador. Isso para estimar uma velocidade mínima do ar 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 4 e 8 m/s.

As tomadas de medidas para os dois direcionadores foram realizadas no mesmo dia. Assim, a temperatura e pressão atmosférica no laboratório foram as mesmas e foram registradas respectivamente com o auxílio de um barômetro de Torricelli e o sensor DHT22, a fim de que possíveis variações dos resultados pudessem ser devidamente ajustadas. A Tabela 4.1 apresenta as condições meteorológicas para o dia de testes.

Tabela 4.1 – Condições meteorológicas no dia da medição.

	Valores
Pressão Atmosférica	100,65 kPa
Temperatura Ambiente	26ºC

No Apêndice II, encontra-se a tabela contendo o *bin* (agrupamento de um conjunto de dados amostrais) correspondente para os dados de rotação, potência gerada na saída do gerador e C_p para os intervalo das velocidades do ar incidente obtidos por meio das técnicas experimentais para a seção de testes da turbina (com suas respectivas incertezas). Os dados medidos tanto pelo tacômetro digital quanto pelo Arduino e seus sensores foram registrados durante 10 minutos para cada incremento de 0,1 m/s da velocidade do ar, a fim de evitar erros de leitura e corresponder a norma IEC-61400-12-1.

A incerteza do tacômetro digital, segundo o catálogo do fabricante é de ± 0,05% da leitura + 1 dígito. Para o Arduino, na faixa de medidas tomadas, a incerteza combinada calculada é de 0,1% da leitura da potência.

5. 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.

No início do teste com a turbina sem o direcinador foi necessária a aplicação de uma rotação para que a turbina iniciasse seu movimento, já que a partida não ocorreu espontaneâmente, notando-se uma maior facilidade para o arranque com a utilização dos direcionadores. Para o direcionador proposto contendo 12 pás a velocidade de arranque foi de 3,7 m/s, demonstrando uma melhor eficiência comparando com o direcionador proposto por Chong *et al.*, 2013., para o qual a sua velocidade de arranque foi de 4,4 m/s. Com isso, percebe-se que a integração entre turbina eólica e qualquer um dos direcionadores facilita o início da rotação, assim como previsto na literatura. Em algumas 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.

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 contém um resumo de desempenho comparando a rotação e a potência de saída máxima para cada um dos casos, com a presença do direcionador - proposto por Chong *et al.*, 2013 - e com o modelo desenvolvido neste trabalho comparando as com o desempenho da turbina sem a presença do direcionador. Utilizou-se os resultados obtidos com maior significação para cada um dos três modelos medidos. Os dados foram retirados da tabela 1 do APÊNDICE II.

Tabela 5.1 – Resumo do desempenho da turbina de eixo vertical com o direcionador proposto na literatura e sem direcionador, para a máxima velocidade do ar incidente na turbina.

Parâmetros	Turbina sem direcionador	Turbina com Direcionador proposto por Chong et al., 2013	Razão de aumento
Velocidade rotacional	144 rpm	398 rpm	2,76
Energia gerada	12,15 mW	17,92 mW	1,47

Tabela 5.2 – Comparação do desempenho da turbina com o direcionador desenvolvido neste trabalho e sem direcionador, para a máxima velocidade do ar incidente na turbina.

Parâmetros	Turbina sem direcionador	Turbina com Direcionador desenvolvido neste trabalho	Razão de aumento
Velocidade rotacional	144 rpm	671 rpm	4,65
Energia gerada	12,15 mW	26,45 mW	2,17

Na Figura 5.1 é representada a variação da rotação da turbina em função da velocidade do ar incidente para os testes sem o direcionador, com a presença do direcionador de 8 pás – Modelo proposto por Chong *et al.*, 2013 - e com o modelo proposto neste trabalho (12 pás).

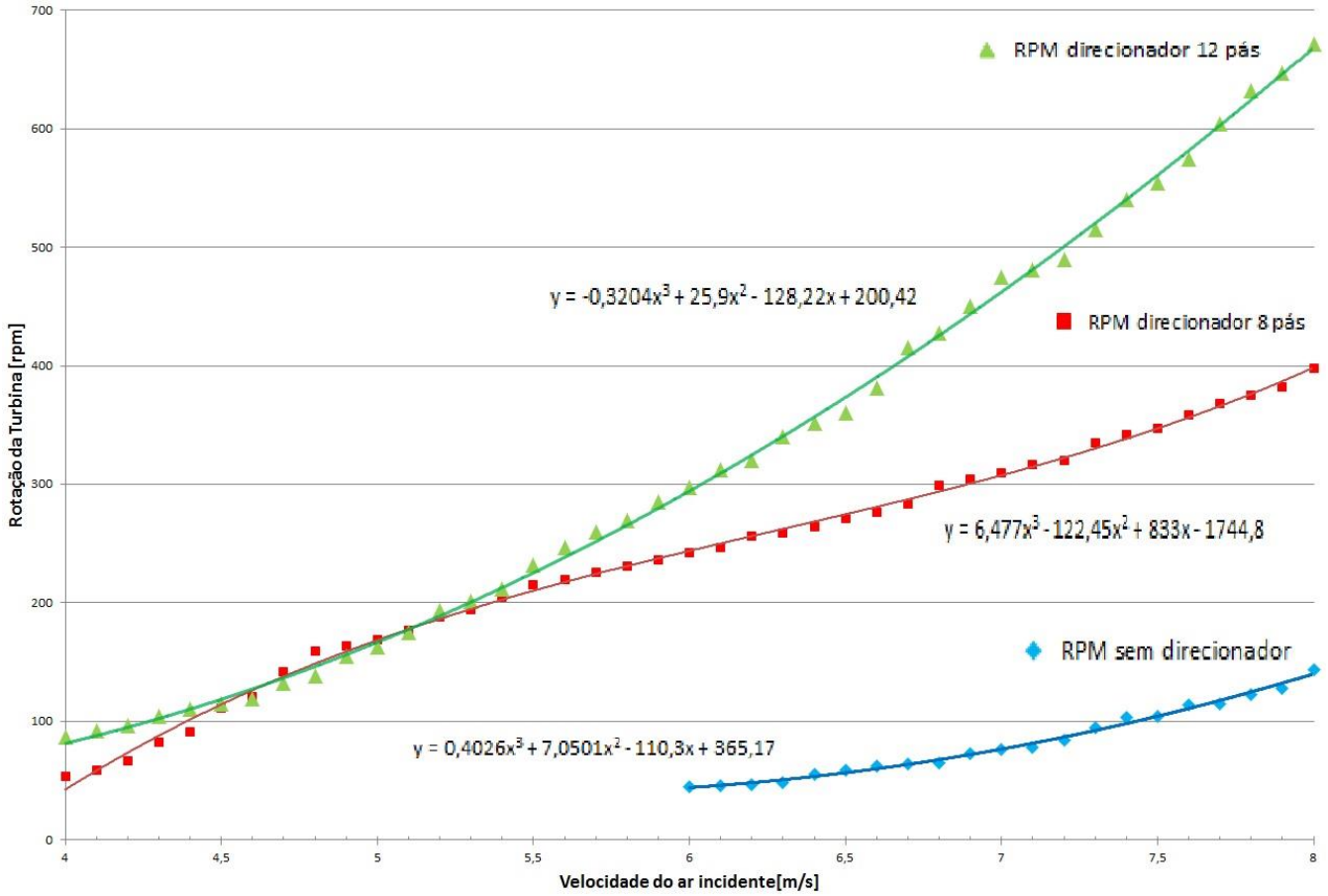


Figura 5.1 - Rotação da turbina [rpm] em função da velocidade do vento incidente. Resultados para turbina sem, com a presença do direcionador - proposto por Chong et al., 2013 - e com o modelo desenvolvido neste trabalho.

Na Figura 5.2 é representado a variação da potência medida na saída do gerador elétrico em função da velocidade do vento incidente, sendo mostrado no gráfico os dados levantados para os testes da turbina sem o direcionador, com a presença do direcionador de 8 pás – Modelo proposto por Chong *et al.*, 2013 - e com o modelo proposto neste trabalho (12 pás).

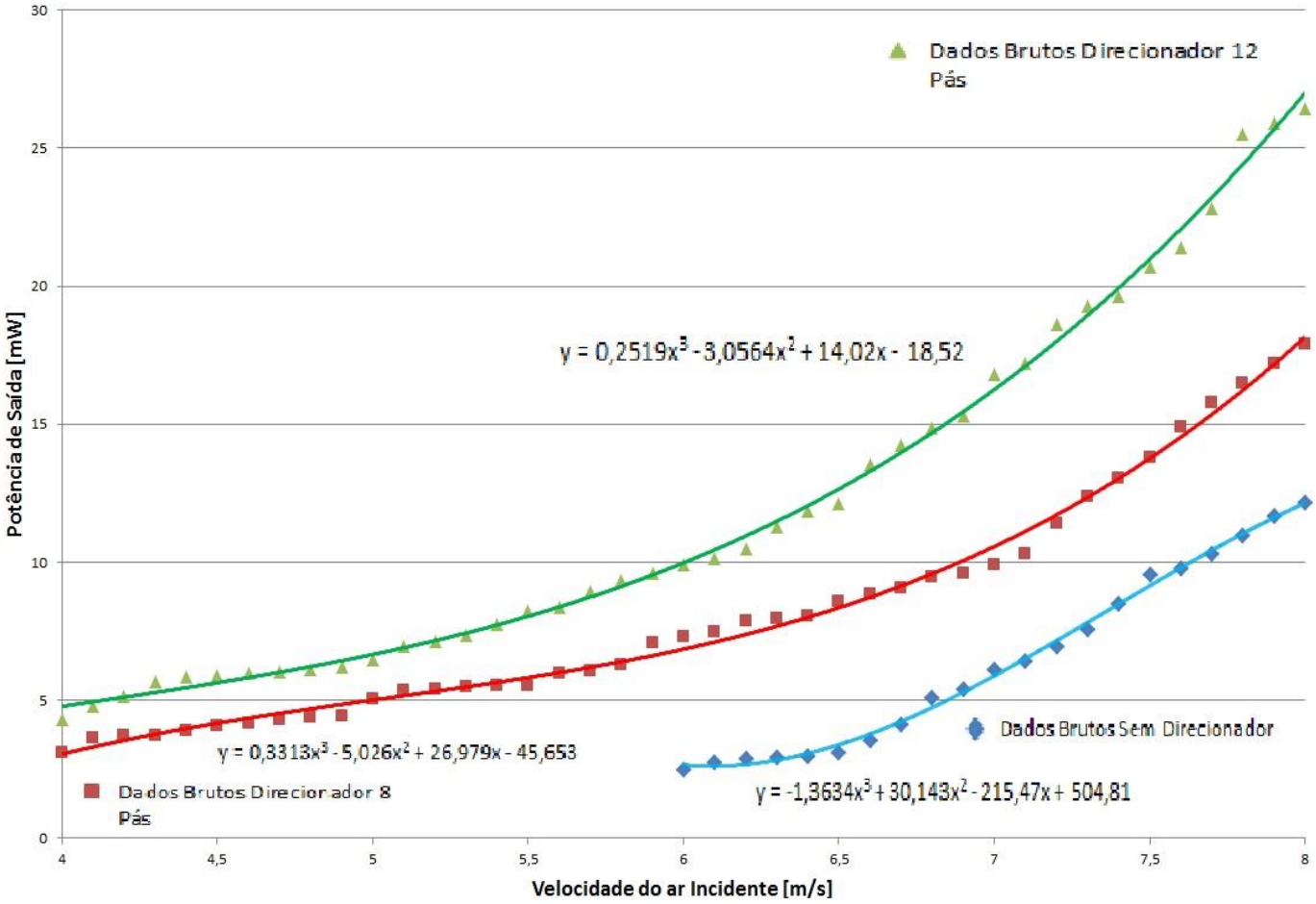


Figura 5.2 – Potência de Saída [mW] em função da velocidade do vento incidente. resultados para turbina sem, com a presença do direcionador - proposto por Chong et al., 2013 - e com o modelo desenvolvido neste trabalho.

A análise dos gráficos e das tabelas demonstram que a utilização de qualquer um dos modelos de direcionador propostos fornece ganhos à turbina, tanto de velocidade rotacional quanto potência na saída do 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 à áreas urbanas. O direcionador de 12 pás, proposto neste trabalho, apresentou uma melhor eficiência da velocidade rotacional e potência de saída se comparado com o direcionador proposto por Chong *et al.*, 2013.

Na figura 5.3 é representado o coeficiente de potência, *Cp*, em função da velocidade do ar incidente, , sendo mostrado no gráfico os dados levantados para os testes da turbina sem o direcionador, com a presença do direcionador de 8 pás – Modelo proposto por Chong *et al.*, 2013 - e com o modelo proposto neste trabalho (12 pás).para os três modelos propostos.

.

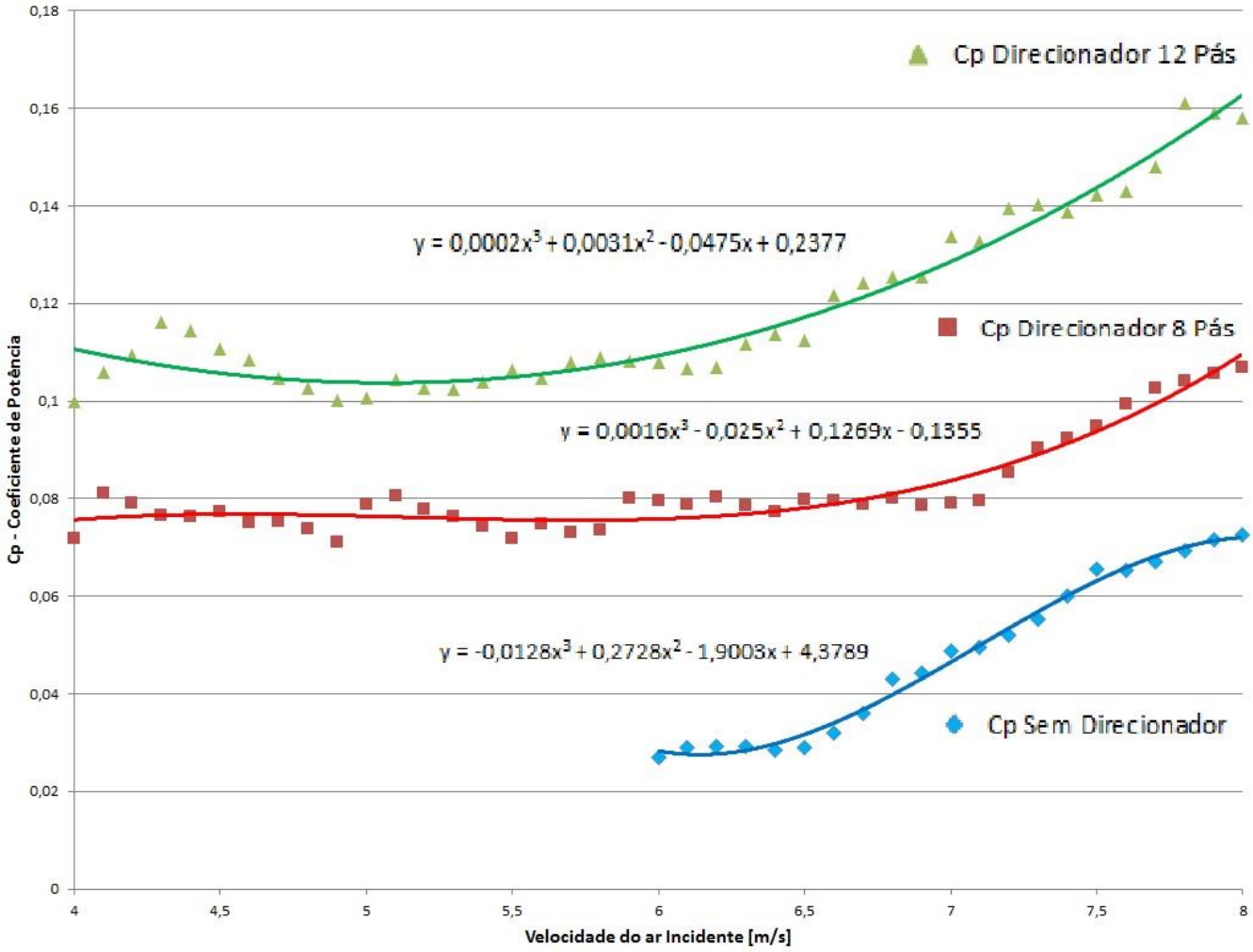


Figura 5.3 – Coeficiente de Potência (Cp) em função da velocidade do vento incidente. Resultados para turbina sem, com a presença do direcionador - direcionador proposto por Chong et al., 2013 - e com o modelo desenvolvido neste trabalho.

A literatura apresenta uma melhora de performance muito maior do que a encontrada no presente trabalho, mesmo para o direcionador construído com base nas dimensões citadas pelo experimento de Chong *et al*., 2013. Acredita-se que o motivo dessa diferença encontrada possa ser atribuído a diferença entre componentes mecânicos, aos materiais utilizados para a confecção do protótipo da turbina, que por serem de menor qualidade e dimensões, não apresentaram um incremento equivalente dos parâmetros medidos com a mesma variação da velocidade do ar.

Outra discussão interessante que pode-se chegar é a diminuição do coeficiente de potência dois casos, com direcionador, ao aumentar a velocidade do ar. Essa redução de performace começa a se estabilizar após a velocidade do ar ultrapassar os 6 m/s. 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 um aumento do arrasto nas pás da turbina, diminuindo a eficiência da turbina quase equivalente à melhoria que o direcionador proporciona.

6. CONCLUSÃO

A metodologia apresentada mostrou-se eficiente para avaliar o desempenho do AEPP (aerogeradores de pequeno porte) em desenvolvimento ou procedimentos de testes para otimização de componentes de um aerogerador. Uma das principais vantagens é o tempo reduzido requerido para levantar a curva de potência e a possibilidade de determinar o coeficiente de potência da turbina, visto que, o possui um sistema de aquisição de dados automatizado para a potência de saída do gerador e a redução da incerteza nos dados coletados.

Comprovou-se que o direcionador de fato melhora a eficiência da turbina. A utilização do direcionador facilitou o início do movimento da turbina eólica, possibilitando o arranque autônomo. A eficiência da turbina aumentou com o uso de qualquer um dos direcionadores, tanto para a velocidade rotacional, quanto para a potência gerada.

O direcionador proposto neste trabalho apresenta um melhor desempenho em relação ao modelo proposto na literatura (Chong *et al.*, 2013), com uma razão de aumento de 68% da velocidade rotacional e 47% da potência gerada. O coeficiente de potência também foi maior com o uso do direcionador desenvolvido neste trabalho, para com o direcionador da literatura, em qualquer velocidade de ar incidente. Entretanto, a eficiência da turbina decai com o aumento da velocidade do ar caracterizando que, mesmo com o direcionador proposto nesse trabalho, a energia produzida não é suficiênte para compensar as perdas energéticas do sistema.

Como sugestão de trabalhos futuros pode-se desenvolver inúmeros tipos de direcionadores de escoamento, para compreender a influência do número de abas e seus respectivos ângulos de ataque, visto que a metodologia apresentada se demostra eficiente para avaliar o desempenho de um AEPP. Também seria interessante a aplicação real da turbina em edificações urbanas.

7. 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: 10 nov. 2015.

Amarante, O. A. C.; Brower, M.; Zack, J.; de Sá, A. L.: **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001. 45 p.

Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica: **Resolução Normativa nº 391**. 2009. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009391.pdf> Acessado em: 10 de novembro de 2015.

Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica: **Nota Técnica nº 0025/2011 - SRD/Aneel**. Aneel: Brasil, 2011. 21 p.

Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica: **Resolução normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. 2012a. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 10 de novembro de 2015.

Betz, A. **The Maximum of the theoretically possible exploitation of wind by means of a wind motor**, Wind Engineering, 37, 4, 441 - 446, 2013, Traduzido de: Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren, Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, Heft 26, 1920.

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.

Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Santoso, S.; Beat y, H. W.: **Electrical power system quality.** USA: McGraw, 2003. 521 p.

Elliott D, Infield D. **An assessment of the impact of reduced averaging time on small wind turbine power curves, energy capture predictions and turbulence intensity measurements.** Wind Energy 2014;17:337–42.

Fox, A. T.; McDonald, R. W. **Introduction to Fluid Mechanics** - John Wiley & Sons, sixth edition, 2004, USA.

Garcia B. S. et al. **ASPECTOS DE DESENVOLVIMENTO DE TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL.** PUCRS. Porto Alegre, 2006.

Gippe, Paul: **Wind Energy Basics: a Guide to small and micro wind systems.** Estados Unidos: Chelsea Green Publishing Company, 1999. 122 p.

Goldemberg, J. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento.** São Paulo, Brasil: Edusp, 1998. 234 p.

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

IEC. Power performance measurements of electricity producing wind turbines. **IEC 61400- 12-1 Ed. 2.0 Wind turbines** - Part 12-1, 2011.

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

Müller G, Jentsch MF, Stoddart E. **Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings.** Renewable Energy 2009; 34:1407 e 12.

Peacock AD, Jenkins D, Ahadzi M, Berry A, Turan S. **Micro wind turbines in the UK domestic sector.** Energy and Buildings 2008; 40:1324 e 33.

Seifried, D.; Witzel, W.: **Renewable energy: the facts.** Freiburg, Germany: Ear thscan, 2010. 251 p.

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

APÊNDICE I – 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:

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

onde R = R(X_1, X_2, X_3,..., X_n) é o resultado em análise e δXi é a incerteza da variável Xi.

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	± 0,05% + 1 díg.
Potência (arduino)	± 0,1%

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 ± 0,05% da leitura + 1 dígitos. As incertezas para cada medição de rotação por minuto, com e sem os protótipos, são apresentadas na tabela do apêndice B e as mesmas foram obtidas através da Eq. (A.1).

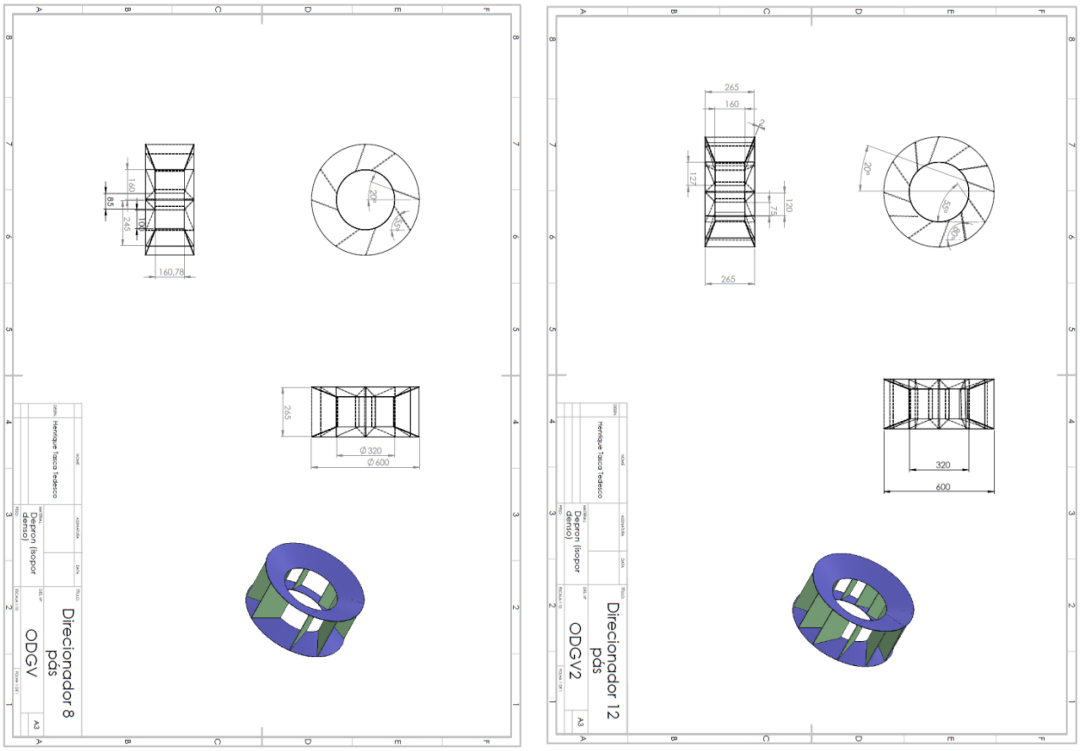
Para as incertezas da leitura de potência no gerador, foi utilizado o sistema arduino com sensor não invasivo de corrente e um divisor de tensão. A combinação de incertezas para cada medição, com e sem os protótipos, são apresentadas na Tabela do apêndice II e as mesmas foram obtidas através da Eq. (A.1).

APÊNDICE II – DADOS NECESSÁRIOS PARA EXPRESSAR A CURVA DE POTÊNCIA.

Tabela 1 – Dados obtidos para expressar a curva de potência.

Densidade do Ar no Dia das Medições = 1,17 [kg/m3]										
bin	Velocidade do Vento Incidente [m/s]	Rotação da Turbina [RPM] Sem Direcionador + Incertezas	Rotação da Turbina [RPM] Direcionador 8 pás + Incertezas	Rotação da Turbina [RPM] Direcionador 12 pás + Incertezas	Potência de Saída [mW] Sem Direcionador + Incertezas	Potência de Saída [mW] Direcionador 8 pás + Incertezas	Potência de Saída [mW] Direcionador 12 pás + Incertezas	Cp Sem Direcionador	Cp Direcionador 8 pás	Cp Direcionador 12 pás
1	8,0	144 ± 2,16	398 ± 5,97	671 ± 10,06	12,15 ± 0,36	17,92 ± 0,53	26,45 ± 0,79	0,0315	0,0463	0,0685
2	7,9	128 ± 1,92	382 ± 5,73	647 ± 9,70	11,67 ± 0,35	17,24 ± 0,516	25,94 ± 0,77	0,0314	0,0462	0,0696
3	7,8	123 ± 1,85	375 ± 5,62	632 ± 9,48	10,98 ± 0,32	16,52 ± 0,49	25,54 ± 0,76	0,0307	0,0461	0,0712
4	7,7	115 ± 1,72	368 ± 5,52	604 ± 9,06	10,32 ± 0,30	15,82 ± 0,47	22,87 ± 0,68	0,0300	0,0459	0,0662
5	7,6	114 ± 1,71	359 ± 5,38	574 ± 8,61	9,78 ± 0,29	14,91 ± 0,44	21,41 ± 0,64	0,0295	0,0450	0,0646
6	7,5	104 ± 1,56	347 ± 5,20	554 ± 8,31	9,55 ± 0,28	13,82 ± 0,41	20,70 ± 0,62	0,0300	0,0434	0,0650
7	7,4	103 ± 1,55	342 ± 5,13	540 ± 8,10	8,49 ± 0,25	13,05 ± 0,39	19,62 ± 0,58	0,0278	0,0427	0,0642
8	7,3	95 ± 1,43	335 ± 5,02	515 ± 7,72	7,59 ± 0,22	12,44 ± 0,37	19,28 ± 0,57	0,0259	0,0422	0,0657
9	7,2	84 ± 1,26	320 ± 4,80	490 ± 7,35	6,95 ± 0,20	11,41 ± 0,34	18,60 ± 0,55	0,0247	0,0405	0,0660
10	7,1	78 ± 1,17	317 ± 4,75	481 ± 7,21	6,41 ± 0,19	10,30 ± 0,30	17,21 ± 0,51	0,0237	0,0381	0,0637
11	7,0	76 ± 1,14	310 ± 4,65	475 ± 7,12	6,13 ± 0,18	9,93 ± 0,29	16,80 ± 0,50	0,0237	0,0384	0,0649
12	6,9	73 ± 1,09	304 ± 4,56	450 ± 6,75	5,40 ± 0,16	9,59 ± 0,28	15,31 ± 0,45	0,0218	0,0387	0,0618
13	6,8	65 ± 0,97	299 ± 4,48	428 ± 6,42	5,10 ± 0,15	9,48 ± 0,28	14,85 ± 0,44	0,0215	0,0400	0,0626
14	6,7	64 ± 0,96	283 ± 4,24	415 ± 6,22	4,13 ± 0,13	9,05 ± 0,27	14,26 ± 0,42	0,0182	0,0399	0,0628
15	6,6	62 ± 0,93	276 ± 4,14	381 ± 5,71	3,56 ± 0,10	8,85 ± 0,26	13,55 ± 0,40	0,0164	0,0408	0,0625
16	6,5	59 ± 0,88	271 ± 4,06	360 ± 5,40	3,12 ± 0,09	8,60 ± 0,25	12,11 ± 0,36	0,0151	0,0415	0,0584
17	6,4	55 ± 0,82	264 ± 3,96	352 ± 5,28	2,98 ± 0,08	8,07 ± 0,24	11,87 ± 0,35	0,0151	0,0408	0,0600
18	6,3	48 ± 0,72	259 ± 3,88	340 ± 5,10	2,95 ± 0,08	7,95 ± 0,23	11,31 ± 0,33	0,0156	0,0421	0,0599
19	6,2	47 ± 0,70	256 ± 3,84	320 ± 4,80	2,87 ± 0,08	7,87 ± 0,23	10,47 ± 0,31	0,0160	0,0438	0,0582
20	6,1	46 ± 0,69	247 ± 3,70	312 ± 4,68	2,75 ± 0,08	7,48 ± 0,22	10,11 ± 0,30	0,0161	0,0437	0,0590
21	6,0	46 ± 0,69	242 ± 3,63	297 ± 4,45	2,48 ± 0,07	7,31 ± 0,21	9,95 ± 0,29	0,0152	0,0448	0,0607
22	5,9	-	236 ± 3,54	285 ± 4,27	-	7,11 ± 0,21	9,58 ± 0,28	-	0,0458	0,0618
23	5,8	-	231 ± 3,46	269 ± 4,03	-	6,30 ± 0,18	9,34 ± 0,28	-	0,0428	0,0634
24	5,7	-	226 ± 3,39	260 ± 3,90	-	6,05 ± 0,18	8,94 ± 0,26	-	0,0433	0,0640
25	5,6	-	220 ± 3,30	247 ± 3,70	-	5,99 ± 0,17	8,36 ± 0,25	-	0,0452	0,0631
26	5,5	-	215 ± 3,22	232 ± 3,48	-	5,54 ± 0,16	8,21 ± 0,24	-	0,0441	0,0654
27	5,4	-	205 ± 3,07	212 ± 3,18	-	5,53 ± 0,16	7,74 ± 0,23	-	0,0465	0,0651
28	5,3	-	194 ± 2,91	201 ± 3,01	-	5,49 ± 0,16	7,36 ± 0,22	-	0,0489	0,0655
29	5,2	-	188 ± 2,82	193 ± 2,89	-	5,39 ± 0,16	7,12 ± 0,21	-	0,0508	0,0671
30	5,1	-	177 ± 2,65	175 ± 2,62	-	5,38 ± 0,16	6,97 ± 0,20	-	0,0538	0,0696
31	5,0	-	169 ± 2,53	163 ± 2,44	-	5,07 ± 0,15	6,48 ± 0,19	-	0,0538	0,0687
32	4,9	-	164 ± 2,46	155 ± 2,32	-	4,41 ± 0,13	6,21 ± 0,18	-	0,0497	0,0700
33	4,8	-	159 ± 2,38	138 ± 2,07	-	4,41± 0,13	6,12 ± 0,18	-	0,0527	0,0733
34	4,7	-	142 ± 2,13	132 ± 1,98	-	4,32 ± 0,12	6,01 ± 0,18	-	0,0551	0,0767
35	4,6	-	121 ± 1,81	119 ± 1,78	-	4,15 ± 0,12	5,98 ± 0,17	-	0,0565	0,0814
36	4,5	-	111 ± 1,66	115 ± 1,72	-	4,14 ± 0,12	5,87 ± 0,17	-	0,0596	0,0854
37	4,4	-	91 ± 1,36	110 ± 1,65	-	3,89 ± 0,11	5,83 ± 0,17	-	0,0605	0,0907
38	4,3	-	82 ± 1,23	104 ± 1,56	-	3,74 ± 0,11	5,68 ± 0,17	-	0,0623	0,0947
39	4,2	-	67 ± 1,00	96 ± 1,44	-	3,71 ± 0,11	5,13 ± 0,15	-	0,0664	0,0918
40	4,1	-	59 ± 0,88	92 ± 1,38	-	3,65 ± 0,10	4,77 ± 0,14	-	0,0702	0,0917
41	4,0	-	54 ± 0,81	87 ± 1,30	-	3,11 ± 0,09	4,31 ± 0,12	-	0,0642	0,0893

APÊNDICE III – DESENHOS TÉCNICOS.



(a) (b)

Figura 1: desenho técnico direcionador: (a) *direcionador de 8 pás - Direcionador proposto por Chong et al., 2013. e*
(b) *direcionador de 12 pás - Direcionador proposto neste trabalho.*

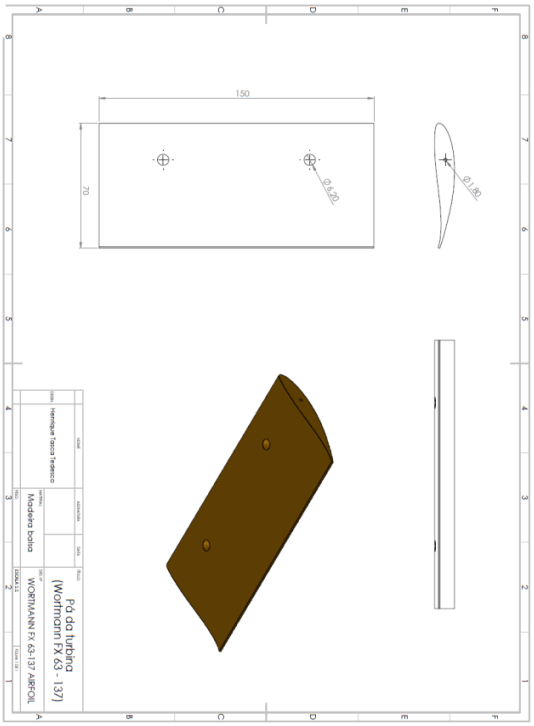


Figura 2 – Desenho técnico do Perfil das pás - WORTMANN FX 63-137 AIRFOIL.

ANEXO I – TABELA CONTENDO ALGUMAS MEDIDAS ADOTADAS DA NORMA IEC-6140-12-1.

Tabela 1. Especificações da norma IEC-6140-12-1 para AEPP (aerogeradores de pequeno porte).

Local dos testes	Terrenos planos e abertos evitando terrenos com arvores, prédios e outras obstruções que afetem o desempenho do aerogerador.
Medida de potência	A potencia da turbina deve ser medida na conexão da carga.
Transdutor de potência	O trandutor de potência deve medir o TRUE RMS da potência. Faixa de medida: de -50% a 200% da potência nominal da turbina.
Velocidade do vento	Medida com anemômetro de conchas calibrado.
Carga	Utilizar uma carga capaz de dissipar toda energia quando as baterias estiverem totalmente carregadas e manter a tensão das baterias em uma faixa de no máximo 10% da tensão nominal de teste.
Controlador de carga	Usado como dispositivo de proteção de tensão das baterias e gerenciamento da energia gerada pelo aerogerador.
Correção da massa específica	As curvas de potência devem ser apresentadas para condições de ar padrão (1,225 Kg/m3). Deve-se medir variáveis meteorológicas para fazer a correção da massa especifica.
Variáveis meteorologias requeridas nos testes.	Temperatura ambiente, pressão atmosférica, umidade relativa e precipitação. O sensor de temperatura e de pressão devem ser montados a uma distancia de 1,5 vezes o diâmetro do rotor abaixo do cubo da turbina, mesmo que a altura seja inferior a 10m do nível do solo.
Coleta de dados	Dados coletados continuamente com uma taxa de amostragem de 1Hz. O sistema de aquisição de dados deve armazenar dados médios, máximos, mínimos e desvio padrão.
Base de dados	Para os AEPP, os dados pré-processados devem ter duração mínima de 1 minuto. Nos AEPP se utiliza o intervalo de 1 minuto como referência para todos os conjuntos de dados no teste da máquina.
Critérios para completar a base de dados	Cada Bin da velocidade do vento entre 1 m/s e 14 m/s deve conter ao menos 10 minutos de dados. O banco de dados deve conter no mínimo de 60 horas de operação do aerogerador dentro da faixa de operação.
Turbinas com sistema de controle de segurança.	AEPP com controle de segurança (furling), a base de dados deve incluir a faixa de velocidade onde ocorre a perda de potência devido a este tipo de controle.
Recomendações gerais:	Tamanhos da fiação, material condutor, tipos e conectores usados para conectar a turbina eólica à carga e a resistência dos cabos elétricos deve medida entre o inversor e a carga ou entre o aerogerador e a carga , se nenhum inversor for utilizado. Caso sejam utilizados dispositivos para controle de sub-tensão ou sobre–tensão estes dispositivo deverão ser considerado como parte do sistema do aerogerador. A tensão nominal do banco de baterias (ex: 12V, 24V, 48V), o tamanho do banco de baterias utilizado (ex ampère hora), e a tempo de uso da bateria também devem ser relatados na apresentação dos dados.

ANEXO II – DATASHEET SENSOR DE CORRENTE SCT-013-000 E DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA, RESPECTIVAMENTE.

Split-Core Current Transformer

Model: SCT-013 Series

Characteristics: Opening size: 13mm×13mm
Non-linearity:±3% (10%—120% rated input current)
1.5m leading wire, Diagram for standard three-output
Current output type or Voltage output type
(Voltage output type built-in sampling resistor)

Purpose: Suitable for the current measuring
monitoring and protection of AC motor
lighting equipment air compressor and so on

Core material: Ferrite

Mechanical strength: The number of switching is not less than 1000 times
(Test under 20℃).

Safety index: Dielectric strength 6000V AC/1min

Fire resistance property: in accordance with UL94-V0

Working temperature: -25℃—+70℃

Outline size diagram: (in mm)

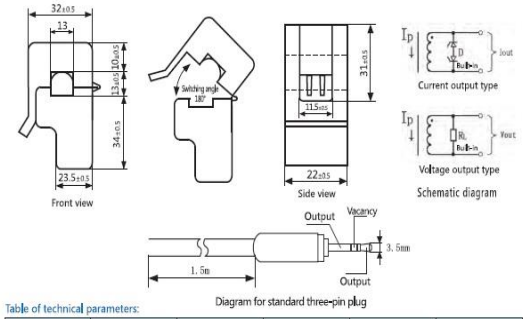


Table of technical parameters:

Model	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
Input current	0-100A	0-5A	0-10A	0-15A	0-20A
Output mode	Current/33mA	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V
Model	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-070
Input current	0-25A	0-30A	0-50A	0-60A	
Output mode	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	

Output mode: Voltage output type built-in sampling resistor; Current output type built-in protective diode;
Forbidden to be opening operating for current type.

Carbon Film Fixed Resistor
Axial Leaded

multicomp

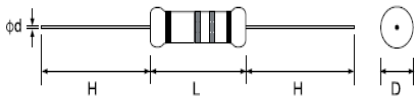
Features

- Automatically insertable
- High quality performance
- Non-Flame type available
- Cost effective and commonly used
- Too low or too high values can be supplied on case to case basis

Performance Specification

Temperature Coefficient	: ≤10Ω	: ±350PPM/°C
	11Ω to 99kΩ	: 0 to -450PPM/°C
	100kΩ to 1MΩ	: 0 to -700PPM/°C
	1.1MΩ to 10MΩ	: 0 to -1500PPM/°C
Short Time Overload	: ±(1% +0.05Ω)Max. with no evidence of mechanical damage	
Insulation Resistance	: Min. 1,000MΩ	
Dielectric Withstanding Voltage	: No evidence of flashover, mechanical damage, arcing or insulation breakdown.	
Terminal Strength	: No evidence of mechanical damage.	
Resistance to Soldering Heat	: ±(1% +0.05Ω)Max. with no evidence of mechanical damage.	
Solderability	: Min. 95% coverage	
Resistance to Solvent	: No deterioration of protective coating and markings	
Temperature Cycling	: ±(1% +0.05Ω) Max. with no evidence of mechanical damage	
Load Life in Humidity	: Normal Type	: <100kΩ : ±(3% +0.05Ω)Max. ≥100kΩ : ±(5% +0.05Ω)Max.
	Non-Flame Type	: <100kΩ : ±(5% +0.05Ω)Max. ≥100kΩ : ±(10% +0.05Ω)Max.
Load Life	: Normal Type	: <56kΩ : ±(2% +0.05Ω)Max. ≥56kΩ : ±(3% +0.05Ω)Max.
	Non-Flame Type	: <100kΩ : ±(5% +0.05Ω)Max. ≥100kΩ : ±(10% +0.05Ω)Max.

Dimension



ANEXO III – 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 Elétricas

• Faixa: 2,5 a 99999 RPM
• Resolução: 0,1 RPM (2,5 a 999,9 RPM) 1 RPM (acima de 1000 RPM)
• Precisão: ± (0,05%Leit. + 1Díg.) • Distância de Detecção: 50 a 250mm