

ENERDAN FERNANDO DAL PONTE

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM AEROGERADOR DE EIXO
VERTICAL APLICADO À AGROINDÚSTRIA

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2017

ENERDAN FERNANDO DAL PONTE

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM AEROGERADOR DE EIXO
VERTICAL APLICADO À AGROINDÚSTRIA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo
Nogueira

Coorientador: Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2017

D149c

Dal Ponte, Enerdan Fernando

Construção e avaliação de um aerogerador de eixo vertical aplicado à agroindústria / Enerdan Fernando Dal Ponte. – Cascavel, PR : UNIOESTE, 2017.

59 p. : il. (color.)

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

Coorientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná- UNIOESTE, Cascavel, 2017.

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura.

1. Energia eólica. 2. Turbina de eixo vertical. 3. Eficiência do sistema. I. Título.

CDD: 621.45

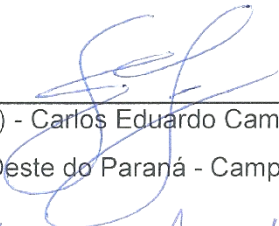
CDU: 621.548.5

Bibliotecária responsável Andrea Figueredo Ferreira – CRB 9º/1703

ENERDAN FERNANDO DAL PONTE

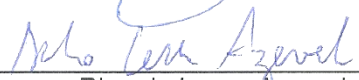
Construção e validação de um aerogerador de eixo vertical aplicado à agroindústria

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



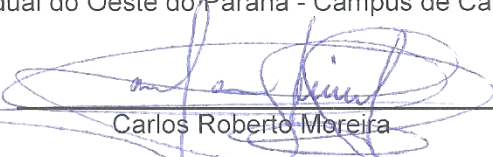
Orientador(a) - Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Ricardo Lessa Azevedo

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Carlos Roberto Moreira

Faculdade Assis Gurgacz (FAG)

Cascavel, 23 de fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, esposa Rosemar Cristiane Dal Ponte e filho Enerdan Fernando Dal Ponte Júnior pelo apoio, paciência, incentivo e compreensão auxiliando diariamente no desenvolvimento deste trabalho.

Especialmente, ao professor Carlos Eduardo Camargo Nogueira pela orientação, apoio, incentivo e comprometimento. Acreditando e confiando no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Jair Antônio Cruz Siqueira pelo auxílio e troca de informações que contribuíram para desenvolvimento do conhecimento.

Aos amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para a realização e testes do projeto de pesquisa.

Ao grande amigo Ilso Dalpizzol, por se fazer presente em todas as etapas da montagem do experimento, independente do horário.

Ao SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, pela disponibilização das instalações, permitindo assim a realização dos testes do projeto de pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DISTRIBUIÇÃO GERAL DOS VENTOS	5
FIGURA 2 : MAPA DE VENTOS DO BRASIL.....	6
FIGURA 3: ROTOR DARRIEUS.....	8
FIGURA 4: ROTOR SAVONIUS.....	9
FIGURA 5: ROTOR H-DARRIEUS	10
FIGURA 6: ROTOR HELICOIDAL.....	10
FIGURA 7: REPRESENTAÇÃO DA ESTIMATIVA DE PERDAS EM UM AEROGERADOR EÓLICO	14
FIGURA 8: ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DE UMA PÁ.....	15
FIGURA 9: CONJUNTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA	16
FIGURA 10: DESENHO CONJUNTO TURBINA	17
FIGURA 11: A) DESENHO DO CONJUNTO DA PÁ DO AEROGERADOR; B) ESTRUTURA DA PÁ DO AEROGERADOR; C) CONJUNTO DA PÁ COM REVESTIMENTO; D) PERFIL DA PÁ DO AEROGERADOR;.....	17
FIGURA 12: TUBOS DE AÇO INOX AISI	18
FIGURA 13 : DESENHO DO ROTOR SUPERIOR DO AEROGERADOR; B) IMAGEM DO ROTOR SUPERIOR DO AEROGERADOR	18
FIGURA 14 : A) DESENHO DO ROTOR INFERIOR DO AEROGERADOR; B) IMAGEM DO ROTOR INFERIOR; C) IMAGEM DO CONJUNTO DO ROTOR INFERIOR COM ROLAMENTO.....	19
FIGURA 15: A) EIXO CENTRAL DA TURBINA; B) ACOPLAMENTO DO ROLAMENTO AO EIXO; C) CONJUNTO ROTOR INFERIOR ACOPLADO AO EIXO	20
FIGURA 16: ROLAMENTO DE ESFERA	20
FIGURA 17 : CONJUNTO DE AMPLIAÇÃO DE ROTAÇÃO	21
FIGURA 18 : MODELO DE BATERIA	22
FIGURA 19: MODELO GERADOR CA TIPO ALTERNADOR AUTOMOTIVO.....	22
FIGURA 20: BANCO DE RESISTÊNCIAS.....	23
FIGURA 21: VENTILADOR AXIAL:.....	23
FIGURA 22 : MULTÍMETRO DIGITAL MODELO MD-6110.....	24
FIGURA 23: ALICATE AMPERÍMETRO DIGITAL MODELO ET-3990	25
FIGURA 24: TERMO-ANEMÔMETRO MODELO TAFR-180	26
FIGURA 25: SISTEMA DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO MODELO SDAV-2	27
FIGURA 26: DINAMÔMETRO DIGITAL PORTÁTIL MODELO DD-500.....	28

FIGURA 27: POSICIONAMENTO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.	29
FIGURA 28: CONJUNTO AEROGERADOR MONTADO	31
FIGURA 29: ENERGIA TOTAL	35
FIGURA 30: MÉDIA VELOCIDADE DO VENTO X POTÊNCIA MÉDIA ALTERNADOR	36
FIGURA 31: MÉDIA VELOCIDADE DO VENTO X ROTAÇÃO DO ALTERNADOR	36
FIGURA 32: HORAS X TENSÃO DA BATERIA NOS TESTES T1 A T5.	37
FIGURA 33: HORAS X ENERGIA ACUMULADA ARMAZENADA NA BATERIA.	37
FIGURA 34: HORA X TENSÃO DA BATERIA EM CARREGAMENTO.....	38
FIGURA 35: HORAS X ENERGIA ACUMULADA FORNECIDA PELA BATERIA.	38
FIGURA 36: HORAS X TENSÃO DA BATERIA EM DESCARGA.	39
FIGURA 37: EFICIÊNCIA EÓLICA-MECÂNICA.....	39
FIGURA 38: EFICIÊNCIA MECÂNICA-ELÉTRICA	40
FIGURA 39: EFICIÊNCIA EÓLICA-ELÉTRICA	40
FIGURA 40: MÉDIAS DAS EFICIÊNCIAS	41
FIGURA 41: AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL	41

DAL PONTE, Enerdan, UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2017. **CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL APLICADO À AGROINDÚSTRIA.**
Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

RESUMO

A energia eólica é uma das formas mais acessíveis de energia renovável. Uma forma eficaz de converter a energia cinética do vento em energia elétrica é utilizando-se turbinas eólicas acopladas a geradores elétricos. O objetivo deste projeto foi a construção de uma turbina eólica de eixo vertical, composta por uma estrutura tubular de aço carbono SAE 1020 e pás formadas por uma estrutura em liga de alumínio e revestidas de policarbonato no desenho de uma gota. A esta turbina, foram acoplados um alternador automotivo, uma bateria e um banco de resistências elétricas, formando assim um sistema completo de geração eólica isolada. Utilizando-se deste conjunto foi possível calcular as eficiências do sistema e obter algumas curvas de desempenho do aerogerador. Foram determinadas a a Potência Eólica Média de 782,41 (W), Potência Mecânica Média de 33,63 (W), Potência Elétrica de Geração Média de 8,76 (W), Eficiência Eólica-Mecânica Média de 4,30 (%), Eficiência Mecânica-Elétrica Média de 26,06 (%) e Eficiência Total Eólica-Elétrica Média de 1,12 (%).

PALAVRAS-CHAVE: energia eólica; turbina de eixo vertical, eficiência do sistema.

DAL PONTE, Enerdan, UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2017. **CONSTRUCTION AND EVALUATION OF A VERTICAL AXLE WIND TURBINE APPLIED TO AGROINDÚSTRIA.** Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

ABSTRACT

Wind energy is one of the most affordable forms of renewable energy. An efficient way to convert kinetic energy from wind into electrical energy is by using wind turbines coupled to electric generators. The objective of this project was the construction of a vertical axis wind turbine, composed of a SAE 1020 carbon steel tubular structure, and blades formed by an aluminum alloy structure and polycarbonate coated in the design of a drop. An automotive alternator, a battery and a bank of electrical resistors were coupled to this turbine, forming a complete system of isolated wind generation. Using this set, it was possible to calculate the system efficiencies and obtain some performance curves of the wind turbine, thus determining the Average Wind Power of 782.41 (W), Average Mechanical Power of 33.63 (W), Average Generation Electric Power (W), Wind-Mechanical Efficiency Average of 4.30 (%), Mechanical-Electrical Efficiency Average of 26.06 (%) and Total Wind-Electric Efficiency Average of 1.12 (%).

KEYWORDS: wind turbine, vertical axis turbine, system efficiency.

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.1 GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO MUNDO	3
2.1.2 GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	5
2.1.2.1 VENTOS NO BRASIL	5
2.1.3 PRINCÍPIOS DA GERAÇÃO EÓLICA	7
2.2 TURBINAS COM EIXO VERTICAL	7
2.3 CONVERSÃO DE ENERGIA MECÂNICA	11
2.4 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO	13
2.5 ENERGIA MÁXIMA TEÓRICA	13
2.6 TORQUE DE UMA TURBINA	14
2.7 ELEMENTOS DE UMA PÁ	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	16
3.2 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	16
3.3 EQUIPAMENTOS PARA TESTES E MEDIÇÕES	24
3.4 METODOLOGIA DE TESTES E MEDIÇÕES	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4. CONCLUSÃO	42

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
APÊNDICE	47

1. INTRODUÇÃO

O interesse em recursos energéticos renováveis aumentou significativamente nos últimos anos, em consequência da crescente poluição ambiental, do aumento da demanda de energia e do esgotamento dos recursos de combustíveis fósseis. Há diferentes fontes de energia renováveis, que incluem a biomassa, solar, geotérmica, hidrelétrica e eólica. Dentre esses recursos o vento provou ser a energia alternativa mais barata e, portanto, extensos esforços de pesquisa têm sido realizados para melhorar a tecnologia de produção de eletricidade através de vento. (BHUTTA et al., 2012)

A energia eólica é uma forma de obtenção de energia de fonte totalmente renovável e limpa e não produz qualquer tipo de poluente. Por essa razão, umas das principais apostas no campo das fontes renováveis de energia.

Segundo Aldabó (2002), a energia dos ventos que pode ser transformada em energia elétrica é muito baixa, atingindo no máximo a porcentagem de 59,3% da energia total (coeficiente de BETZ).

O mundo tem um enorme potencial de energia eólica que pode ser utilizado para geração de eletricidade.

A entrada da energia eólica ingressa no mercado regulado de energia a partir de 2009, como parte da política de diversificação da matriz elétrica e de contratação prioritária de fontes renováveis, o que resultou em um novo marco para a inserção dessa tecnologia no setor elétrico brasileiro. Desde então, empreendimentos eólicos corresponderam a 50% da capacidade de geração de energia elétrica contratada, em MW médios, com preços de venda de energia cada vez mais competitivos, se aproximando do valor médio de termelétricas convencionais (SIMAS, PACCA, 2013).

A primeira turbina eólica a ser utilizada para aproveitamento e geração de energia elétrica foi a turbina de eixo vertical. Contudo, os pesquisadores da era moderna perderam o interesse neste modelo de turbina devido à percepção inicial de que, turbinas de eixo vertical não podem ser usadas para geração de eletricidade em grande escala. Então nas últimas décadas os focos de todas as atividades foram

destinados às turbinas de eixo horizontal. (BHUTTA et al., 2012).

Embora os aerogeradores de eixo horizontal apresentem maior eficiência aerodinâmica, os aerogeradores de eixo vertical, quando bem projetados, podem se tornar vantajosos em situações específicas. Considerando que possuem, de modo geral, uma velocidade de arranque mais baixa (o que é ótimo para condições de vento reduzido), podem ser locados em uma altura mais baixa (facilitando a manutenção do gerador elétrico e diminuindo os custos de instalação), costumam ser mais seguros na presença de ventos mais fortes, e não precisam de dispositivos adicionais para acompanhar a direção do vento (SVENDSEN e MERZ, 2013).

Os principais tipos de aerogeradores de eixo vertical são Darrieus, Savonius e turbinas com torre de vórtices.

Este trabalho tem por objetivo principal, projetar e construir um aerogerador de eixo vertical de pequeno porte, utilizado para carregar uma bateria automotiva, bem como determinar as curvas de desempenho do mesmo, e as eficiências médias dos sistemas mecânico e elétrico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A produção de energia eólica tem-se apresentado ao longo dos últimos anos como uma das principais alternativas renováveis de energia. No entanto, a tecnologia que dá início à evolução dessa indústria não é algo recente. De acordo com Martins, Guarnieri e Pereira (2008), a transformação de energia cinética em energia mecânica (base de funcionamento do sistema eólico) é uma prática utilizada pela humanidade há mais de 3.000 anos, por meio de moinhos de vento utilizados para a moagem de grãos e bombeamento de água para atividades agrícolas. O posicionamento histórico indicado pelos autores, ainda é controverso em relação a outros trabalhos que buscam estabelecer a origem dessa tecnologia. Amarante et al. (2001), por exemplo, demonstram uma postura de maior imparcialidade, ao afirmar que os primeiros aproveitamentos da força do vento pelo homem são de data imprecisa, podendo remontar a milhares de anos na região do Oriente.

É no período da Idade Média, que a humanidade passa a utilizar as forças do vento de forma mais acentuada, contribuindo com o desenvolvimento da navegação e com os interesses das Cruzadas financiadas pelos senhores feudais e pela Igreja Católica (AMARANTE et al., 2001).

2.1.1 Geração de energia eólica no mundo

A maior parte das turbinas eólicas até 2009 se concentrava na Europa, em virtude da tecnologia disponível e estímulo da política para investir em tecnologias limpas. Atualmente, apenas 27% das turbinas estão instaladas na Europa, deixando o continente em terceiro lugar no ranking de energia eólica (RABE, 2011).

A Ásia, foi o continente que assumiu a produção eólica mundial e em 2009, foi responsável por 40% de turbinas instaladas. Das turbinas instaladas, a grande maioria está na China, a qual reconheceu que o investimento tem trazido energia barata e limpa. Além de possuir grandes parques eólicos, a China, possui micro parques especialmente, em áreas rurais que não possuem acesso à rede elétrica. Assim, a energia gerada por essas turbinas chega a abastecer o vilarejo inteiro, e se

apresenta como um investimento barato, pois gera em torno de 2 kWh, e custam de 800 a 1000 euros cada aerogerador (RABE, 2011).

Segundo Ramos (2011) e Seidler (2011), a energia eólica pode garantir 10% das necessidades mundiais de eletricidade até o ano 2020, reduzindo a emissão global de dióxido de carbono na atmosfera em mais de 10 bilhões de toneladas. Pode-se chegar, em 2020, a um total de 1,2 milhão de MW de energia eólica instalada ao redor do mundo, que é o total de energia necessária para abastecer toda a Europa.

A Tabela 1 apresenta os dez países líderes em geração de energia eólica no ano de 2012, destacando-se entre eles a China com geração total de 62,7 mil (MW) e os Estados Unidos com 46,9 mil (MW). Somando-se a geração dos demais países obtêm-se um total de 95,8 mil (MW).

Tabela 1 - Os 10 países líderes em energia eólica.

Posição	País	MW (mil)
1º	China	62,7
2º	Estados Unidos	46,9
3º	Alemanha	29
4º	Espanha	21,6
5º	Índia	16
6º	França	6,8
7º	Itália	6,7
8º	Reino Unido	6,5
9º	Canadá	5,2
10º	Portugal	4

Fonte: Barbosa, 2012.

2.1.2 Geração de energia eólica no Brasil

De acordo com Pinto (2014), entre 1973 e 1983, o IEA/CTA (Instituto de náutica e Espaço/Centro de Tecnologia Aeroespacial) construiu e fez ensaios de 15 protótipos de turbinas eólicas. Em 1992, a primeira turbina eólica foi instalada no país, sendo também a primeira da América do Sul.

O Brasil, tem uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo. As fontes renováveis respondem por aproximadamente 73% da produção majoritariamente de fonte hidrográfica. Apenas 0,31% é de fonte eólica (em julho de 2011). (PINTO, 2014, p. 271).

2.1.2.1 Ventos no Brasil

O ordenamento geral dos ventos no Brasil é controlado pelas características da circulação geral planetária da atmosfera, conforme Figura 1. Dentre eles, sobressaem os sistemas de alta pressão anticiclone subtropical do Atlântico Sul e do Atlântico Norte, e a faixa de baixas pressões da depressão Equatorial.

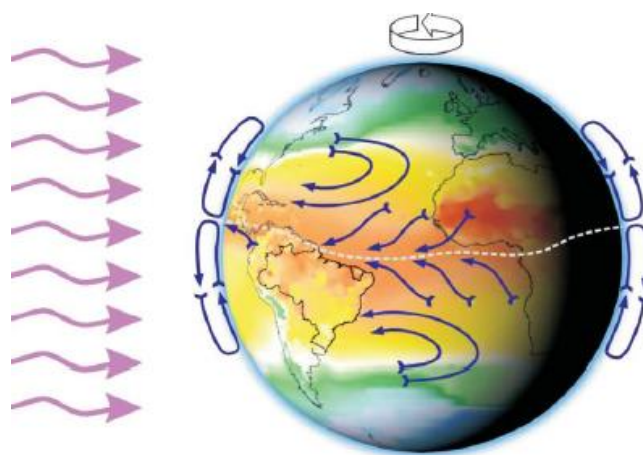


Figura 1: Distribuição geral dos ventos
Fonte: Atlas do Potencial Brasileiro - 2001

No Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001), encontra-se a posição média da Depressão Equatorial que estende-se de oeste a leste ao longo da região Norte do Brasil e sobre o Oceano Atlântico adjacente. Ela coincide com a localização e orientação da Bacia Amazônica, no centro da qual existe uma faixa persistente de baixas pressões.

A Depressão Equatorial é geralmente uma zona de pequenos gradientes de pressão e ventos fracos. Ao norte da Depressão Equatorial os ventos são persistentes de leste a nordeste. Ao sul, os ventos são persistentes de leste a sudeste entre a Depressão Equatorial e o Anticiclone Subtropical Atlântico, o qual tem uma posição média anual próxima a 30°S, 25°W. Esse perfil geral de circulação atmosférica induz ventos de leste ou nordeste sobre o território brasileiro ao norte da Bacia Amazônica e no litoral nordeste. Os ventos próximos à superfície são geralmente fracos ao longo da Depressão Equatorial, porém aumentam sua intensidade ao norte e ao sul dessa faixa (CRESESB, 2001).

A área entre a Depressão Equatorial e a latitude de 10°S é dominada pelos ventos alísios de leste a sudeste. Ao sul da latitude 10°S, até o extremo sul brasileiro, prevalecem os efeitos ditados pela dinâmica entre o centro de alta pressão Anticiclone Subtropical Atlântico, os deslocamentos de massas polares e a Depressão do Nordeste da Argentina – centro de baixas pressões a leste dos Andes (CRESESB, 2001).

Conforme o mapa do Centro Brasileiro de Energia Eólica (2001), na Figura 2, percebe-se que a velocidade média dos ventos em grande parte do território brasileiro é de 5,0 m/s. Na região oeste do Paraná a velocidade está entre 5,0 e 7,0 m/s.

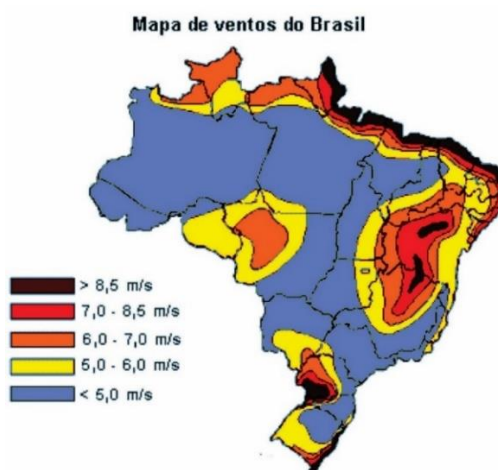


Figura 2 : Mapa de ventos do Brasil
Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica – 2001

2.1.3 Princípios da geração eólica

A geração de energia eólica é um processo mediante a captação da energia cinética provocada pelo vento, a qual movimenta pás de grandes turbinas que convertem esse movimento em energia elétrica. O funcionamento de uma turbina eólica envolve vários campos do conhecimento, incluindo meteorologia, aerodinâmica, eletricidade, controle, além da engenharia mecânica e estrutural (ROSSI, 2010).

Os Aerogeradores são classificados pela posição dos eixos de seus rotores, que podem ser de eixo horizontal ou vertical. Os Aerogeradores de eixo horizontal são mais comuns, e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Nestes aerogeradores, as forças de sustentação atuam perpendicularmente ao escoamento (ROSSI, 2010).

Os aerogeradores de eixo vertical, podem ser movidos por forças de sustentação e por forças de arrasto, captando a energia dos ventos sem precisar alterar a posição do rotor, independente da mudança na direção dos ventos, (ROSSI, 2010).

De acordo com Duarte (2010), considera-se que uma das vantagens dos aerogeradores de eixo vertical é de não necessitar de um dispositivo de controle de direção elaborado e seus componentes podem ser montados na altura do solo.

2.2 Turbinas com eixo vertical

Os projetos mais antigos de rotores com eixo vertical só podiam ser construídos como simples rotores de arrasto. A principal vantagem é que não precisavam de nenhum tipo de controle de ajuste para mantê-los na direção do vento. Outra vantagem é que o maquinário pesado contido na nacele (compartimento instalado no alto da torre da turbina e que abriga o gerador, a caixa de engrenagens e outros componentes mecânicos) pode ser levado ao solo, onde pode facilmente ser submetido à manutenção. (PINTO, 2014)

Este tipo de turbina apresenta como desvantagens, os baixos valores para a TSR (Tip Speed Ratio – Razão da Velocidade de Ponta da Pá) e da dupla incapacidade de partida própria e controle de potência de saída pela ausência de um mecanismo de passo. Além dos ventos próximos ao solo serem mais fracos também são turbulentos, o que aumenta a tensão sobre uma turbina de eixo vertical. (PINTO, 2014).

Rotor de Darrieus

Este rotor foi proposto por Georges Jean Darrieus, em 1925 e foi patenteado em 1931. É preferencialmente construído com duas ou três pás, apresentando uma curvatura em forma de catenária. (PINTO, 2014)

A figura 3 mostra um exemplo de rotor de Darrieus, construído com três pás. Neste modelo as setas indicam a direção do vento e sua ação nas pás, fazendo com que o rotor ao centro entre em movimento.

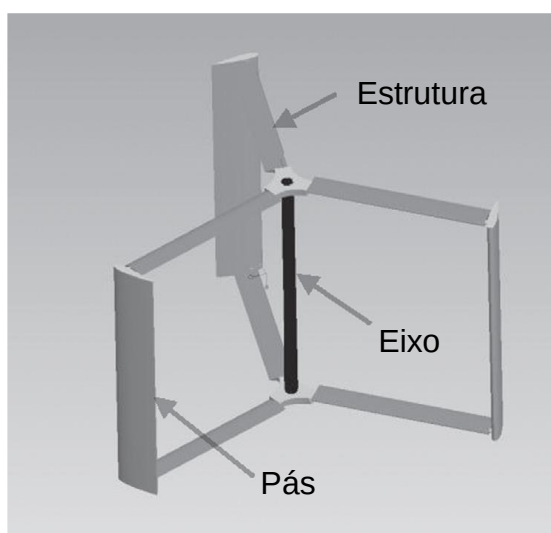


Figura 3: Rotor Darrieus
Fonte: Nobile Rosario - 2014

Rotor de Savonius

Esse modelo foi apresentado em 1926, pelo engenheiro finlandês Sigurd Johannes Savonius. O rotor tem uma pá em forma de “S” e opera como um anemômetro de copo com o vento passando entre suas pás, que se dispõem como folhas dobradas, como semicilindros. O rotor de Savonius também é denominado rotor “S”, e é uma turbina de baixa rotação e alto torque, que pode trabalhar com baixas velocidades do vento e tem o predomínio de forças de arrasto. (PINTO, 2014)

Conforme figura 4, é possível observar um exemplo de gerador Savonius que utiliza as pás em forma de “S”.



Figura 4: Rotor Savonius
Fonte: Torresi Marco - 2013

Rotor H

Apesar de sua simplicidade, H-rotor foi desenvolvido mais tarde do que Musgrove e giromill, rotores embora tenha sido mencionado na patente Darrieus originais. O conceito estrutural do H-rotor é semelhante ao giromill construído por MCAIR. No entanto, o H-rotor desenvolvido pelo vento vertical é muito mais simples, uma vez que, o rotor não tem detecção de vento e caixa de velocidades. Um número menor de partes em comparação com turbinas eólicas convencionais dá maior disponibilidade e confiabilidade, bem como menor custo de manutenção. Além disso, o H-rotor é mais silencioso do que um aerogerador de eixo horizontal de tamanho similar. (TJIU, 2015)

O rotor H é uma variação do rotor de Darrieus, e em vez das pás curvadas, são usadas pás em linha reta, conectadas por suportes ao eixo do rotor. A área de interceptação do vento deste rotor é um retângulo: o formato deveria varrer uma área maior do que uma elipse e, teoricamente, capturar mais energia. Cada pá é montada de forma que possa girar em torno de seu próprio eixo vertical, permitindo que as pás sofram de certo modo algum tipo de controle de passo, de maneira que elas sempre tenham um ângulo de ataque em relação ao vento. A principal vantagem dessa configuração é que o torque gerado permanece praticamente constante ao longo de uma boa faixa de ângulos. Nesse intervalo, o torque gerado se encontra perto do máximo possível, o que significa que o sistema também gera o máximo de potência. (PINTO, 2014)

A figura 5 mostra o modelo de gerador Rotor H que utiliza as pás em linha reta.



Figura 5: Rotor H-Darrieus
Fonte: <http://videolike.org/video/h-rotor>

Rotor Helicoidal

É uma variação do rotor de Darrieus, com as pás em forma helicoidal, torcidas em 180° , inventadas pelo russo Alexander M. Gorlov. Devido ao seu formato, o rotor pode funcionar para qualquer direção de fluxo. (PINTO, 2014)

Embora a turbina tenha sido originalmente concebida como uma turbina de água, em sua patente descreve-se, que ela pode ser utilizada para sistemas de energia hidropneumática, hidráulica, eólica e de onda. (TJIU, 2015)

Na figura 6 observamos um gerador Rotor Helicoidal com as pás em forma helicoidal torcidas em 180° .



Figura 6: Rotor Helicoidal
Fonte: Firoz Alam – 2013

2.3 Conversão de energia mecânica

Após a incidência dos ventos na turbina eólica, inicia-se o processo de conversão da energia mecânica em energia elétrica. Esta etapa é realizada por dois sistemas: o multiplicador mecânico e o gerador elétrico.

- Multiplicador mecânico – na grande maioria dos geradores eólicos a turbina trabalha em baixas rotações e o gerador elétrico em altas rotações. Então o multiplicador realiza a função de compatibilizar estas rotações, o que o torna responsável pela conversão de torque e velocidade.
- Gerador elétrico – o gerador elétrico faz parte de ambos os processos, conversão em energia mecânica e em energia elétrica, justamente por receber a energia mecânica do multiplicador e a converter em energia elétrica.

Máquinas Elétricas

Segundo Fritgerald (2006), as máquinas elétricas rotativas são conhecidas por diversos nomes: CC, síncronas, de ímãs permanentes, de indução, entre outros. Os princípios físicos das máquinas elétricas são bastante similares. Por exemplo, uma máquina CC possui tanto um rotor quanto um estator, e o fluxo magnético no espaço trabalha exatamente com o mesmo princípio de uma máquina de indução.

Máquina CA

As máquinas CA classificam-se em duas categorias: síncronas e de indução. Nas máquinas síncronas, as correntes de enrolamento do rotor são fornecidas por meio de contatos rotativos fixados diretamente na parte estacionária do motor. Nas máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio da combinação da variação de correntes no estator e do movimento do rotor em relação ao estator (FRITGERALD, 2006).

Máquina CC

Conforme Fritgerald (2006), o enrolamento de armadura de um gerador CC está no rotor com a corrente saindo dele por meio de escovas de carvão. O enrolamento de campo está no estator e é excitado por corrente contínua.

No caso do gerador CC elementar, o comutador, em qualquer instante, conecta o lado da bobina que está próximo do polo sul à escova positiva e o lado da

bobina que está próximo ao polo norte, à escova negativa. O comutador executa uma retificação de onda completa tornando disponível uma tensão unipolar para o circuito externo. (FRITGERALD, 2006).

Alternador

É a central elétrica de veículo automotivo. Acionado pelo motor do veículo por meio de uma correia. O alternador transforma a energia mecânica (giro) em energia elétrica necessária para carregar a bateria e alimentar os consumidores, como os sistemas de ignição, injeção e os demais equipamentos elétricos. (BOSCH, 2015).

Os principais componentes dos alternadores são:

Rotor - Construído sobre um eixo de aço, possui em seu interior uma bobina de cobre fixada no seu eixo que é envolvida por um par de rodas polares.

No momento em que a chave de ignição é ligada, o rotor recebe da bateria a tensão que induzirá nos fios da bobina uma corrente elétrica. Esta corrente produz o campo magnético que induzirá a produção de corrente elétrica.

Estator - No estator é produzida a corrente elétrica. As bobinas de fios de cobre são fixadas sobre um núcleo constituído em aço. A corrente elétrica é induzida pelo campo magnético, agindo nos fios do estator.

Conjunto retificador - A tensão e corrente produzidas no alternador são alternadas, e não servem para alimentar os equipamentos elétricos do veículo nem para carregar a bateria, assim é necessário que sejam retificadas ou filtradas. Tem a função de transformar corrente e tensão alternadas em contínuas.

Regulador eletrônico de tensão - É resultado dos contatos das escovas de carvão com o coletor, o regulador realiza o monitoramento e regula a tensão do alternador, adequando os níveis de tensão e corrente às condições ideais para o bom funcionamento do alternador.

A tensão necessária à produção de corrente deve estar de acordo com o sistema elétrico do alternador, caso contrário todo o sistema pode ser danificado. (BOSCH, 2015).

2.4 Determinação do potencial eólico

A energia eólica é gerada por meio de aerogeradores, os quais usam a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento), captada 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 representada por:

$$P_{eólica} = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (1)$$

Em que C_p é o coeficiente de potência, ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), v é a velocidade do vento (m/s), $P_{eólica}$ é a potência eólica teórica (W) e A é a área perpendicular ao escoamento considerada (m^2). Nota-se a importância de C_p no cálculo por representar a eficiência teórica 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 $1,2250 \text{ kg/m}^3$ ao nível do mar para $1,0065 \text{ kg/m}^3$ a 2 km de altitude. Ressalta-se ainda, a importância da umidade relativa e da temperatura do ar, cujos aumentos fazem diminuir ρ . (SILVA, 2011).

2.5 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 necessária uma massa sólida que

cobriria 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 por ela 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 teórica 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). Quando atribuídos outros requisitos de engenharia - principalmente perdas mecânicas e elétricas – os valores reais atingidos estão significativamente abaixo do limite de Betz, com valores por volta de 40%, para serem usados mesmo entre os mais bem desenhados aerogeradores.

A figura 7 representa um esquema das eficiências de um gerador eólico.



Figura 7: Representação da estimativa de perdas em um aerogerador eólico
Fonte: Tedesco Henrique - 2015

2.6 Torque de uma turbina

Pinto (2014), afirma que quando uma turbina eólica, de maneira mecânica, extrai potência do vento, ela transmite essa energia aos eixos rotativos da turbina. A aplicação do torque ao eixo resulta em forças internas ou pressões ao material do eixo. Essa pressão é conhecida como estresse, e é medida em Pa ou N/m². Quando a potência está sendo transmitida por um eixo, um torque T será gerado. Esse torque é representado por:

$$T = \frac{P}{\omega_t} \quad (2)$$

Em que T é o torque produzido pelo conjunto (Nm), P é a potência mecânica (W) e ω_t é a velocidade angular tangencial (rad/s).

O coeficiente de torque C_t é definido por:

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (3)$$

em que C_p é o coeficiente de potência da turbina e λ , a razão de velocidade da ponta da pá.

A partir da equação do torque e fazendo-se $r = D/2$, tem-se:

$$\lambda = u/v = (\omega_t r)/v = (\omega_t D)/2v. \text{ logo } \omega_t = (2v\lambda)/D \quad (4)$$

D é o diâmetro externo da turbina e ω_t é a velocidade angular do rotor.

Substituindo-se a EQ.(1) e a EQ. (4) na EQ.(2), tem-se:

$$T = \frac{C_p \rho A v^2 D}{2 \cdot 2\lambda} \quad (5)$$

como $\lambda = C_p / C_t$, então:

$$T = \frac{C_t \rho A v^2 D}{4} \quad (6)$$

O torque varia com o quadrado da velocidade v e a potência varia com o cubo da velocidade do vento v^3 .

2.7 Elementos de uma pá

A figura 8 mostra os elementos constituintes de uma pá, sendo β o ângulo de passo, a inclinação do eixo de referência em relação ao plano de rotação. Extrado é a parte de cima da pá, e intrado é a parte de baixo.

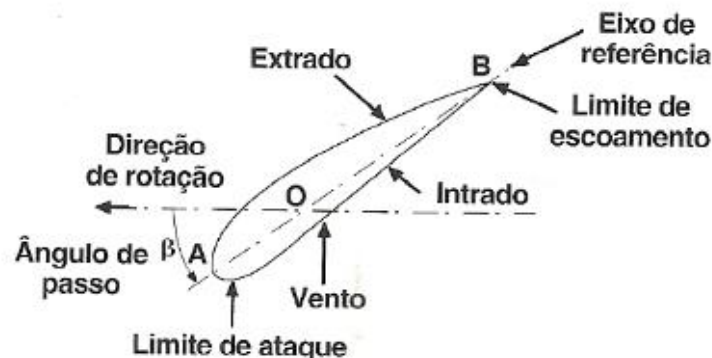


Figura 8: Elementos característicos de uma pá
Fonte: Pinto -2014

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização do Experimento

O presente trabalho foi realizado no município de Cascavel, no laboratório de Metalmecânica do SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial.

Foi desenvolvido o protótipo de um aerogerador, constituído por uma turbina de eixo vertical acoplado a um alternador automotivo com retificador de corrente, utilizado para carregar uma bateria e acionar uma carga resistiva. Portanto, o sistema completo é composto pelo aerogerador (turbina e alternador), uma bateria de chumbo ácido e uma carga resistiva.

3.2 Construção do protótipo

Todos os componentes do sistema de geração eólica foram devidamente dimensionados, e estão representados na figura 9.

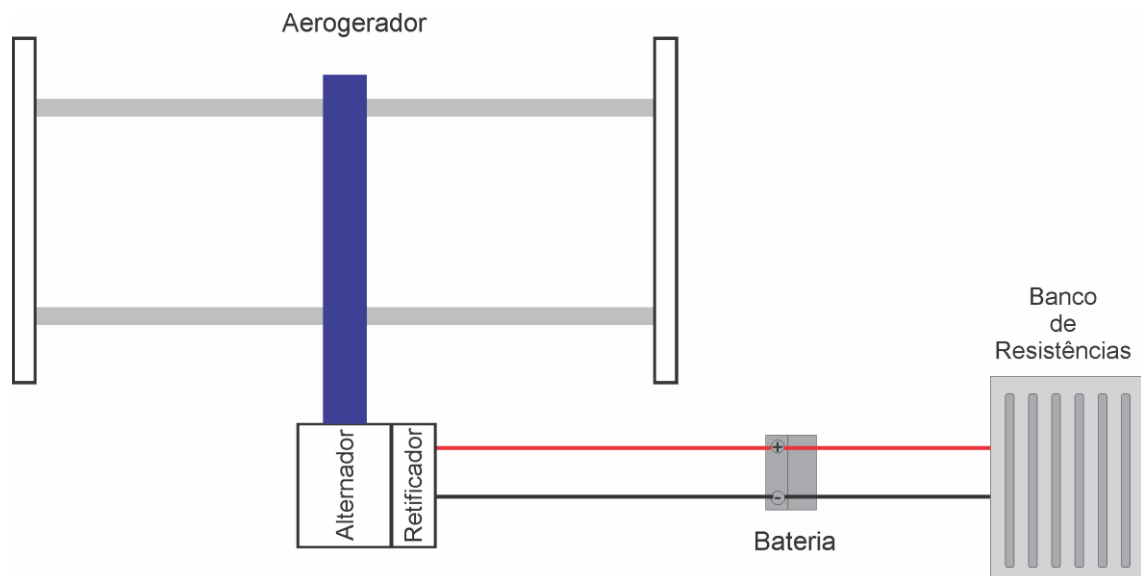


Figura 9: Conjunto de Geração de Energia
Fonte: do autor

O conjunto aerogerador é composto por uma turbina de eixo vertical baseada no modelo H-Darrieus, com conjunto de ampliação de rotação, alternador automotivo, bateria e banco de resistência.

A turbina é composta por: pás, estrutura, mancais e eixo principal. O conjunto da turbina eólica tem 2000mm de diâmetro por 1000mm de altura, projetada e desenvolvida utilizando-se ferramenta CAD de modelagem 3D (Figura 10).

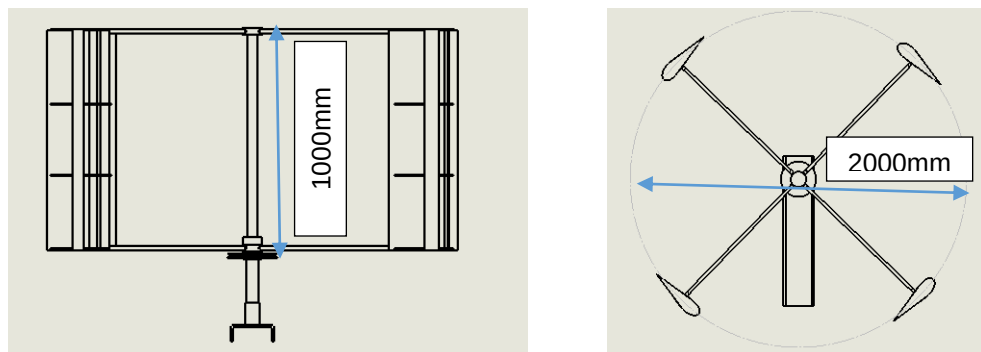


Figura 10: Desenho conjunto turbina
Fonte: do autor

O perfil da pá foi desenvolvido no formato de gota, semelhante a uma asa de avião, com dimensões de 380mm x 90mm x 1000mm, em Polietileno de Alta Densidade (PEAD), alinhados e fixados por duas chapas de aço SAE 1020, formando assim a estrutura da asa. Para o fechamento foi utilizado uma chapa de aço SAE 1010 com 0.8 mm de espessura, fixada por meio de parafusos M4, que contornam a estrutura formando a asa, conforme figura 11. Essas dimensões estão correlacionadas com as condições e limites dos equipamentos de usinagem disponíveis.

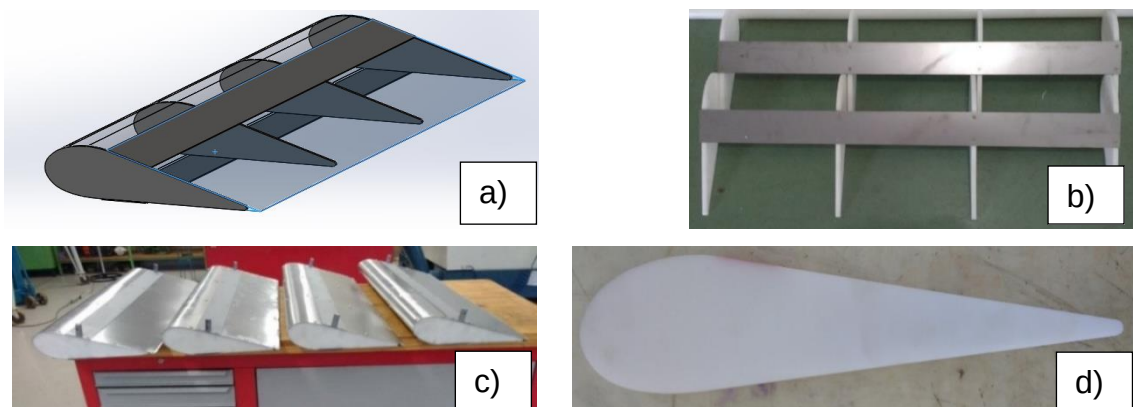


Figura 11: a) Desenho do conjunto da pá do aerogerador; b) Estrutura da pá do aerogerador;
c) Conjunto da pá com revestimento; d) Perfil da pá do aerogerador;
Fonte: do autor

Para ligar as pás ao conjunto de rotores, utilizou-se tubos de aço inox AISI 304 com 21 mm de diâmetro e 900mm de comprimento, fixados com parafusos e porcas M4 (Figura 12).



Figura 12: Tubos de aço inox AISI
Fonte: do autor

A ligação da estrutura com o eixo central foi realizada por meio de um rotor de aço carbono SAE 1020, usinado em torno CNC, para acomodar os rolamentos, possibilitando a movimentação das asas. Os rotores são acoplados no eixo principal (Figuras 13 e 14).

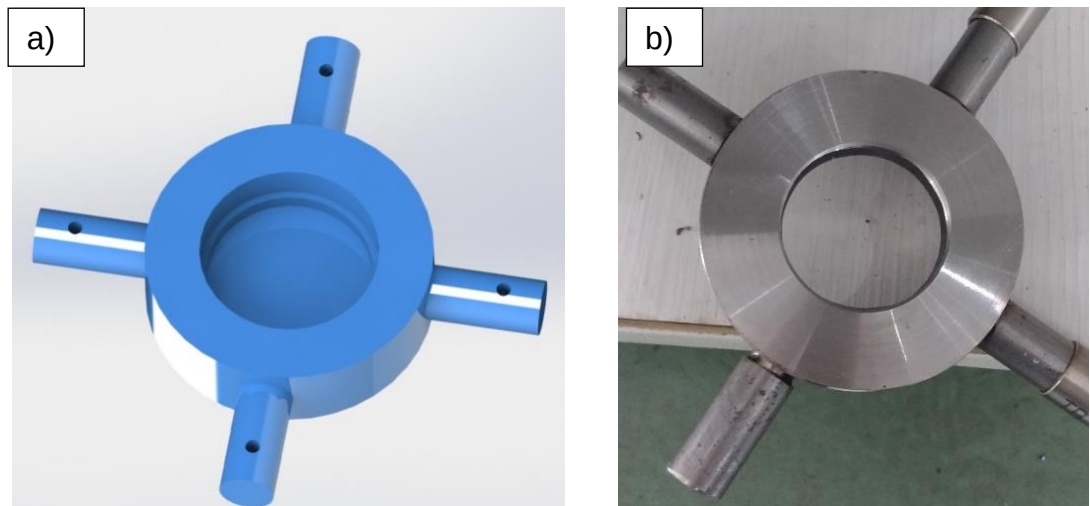


Figura 13 : Desenho do rotor superior do aerogerador; b) imagem do rotor superior do aerogerador
Fonte: do autor

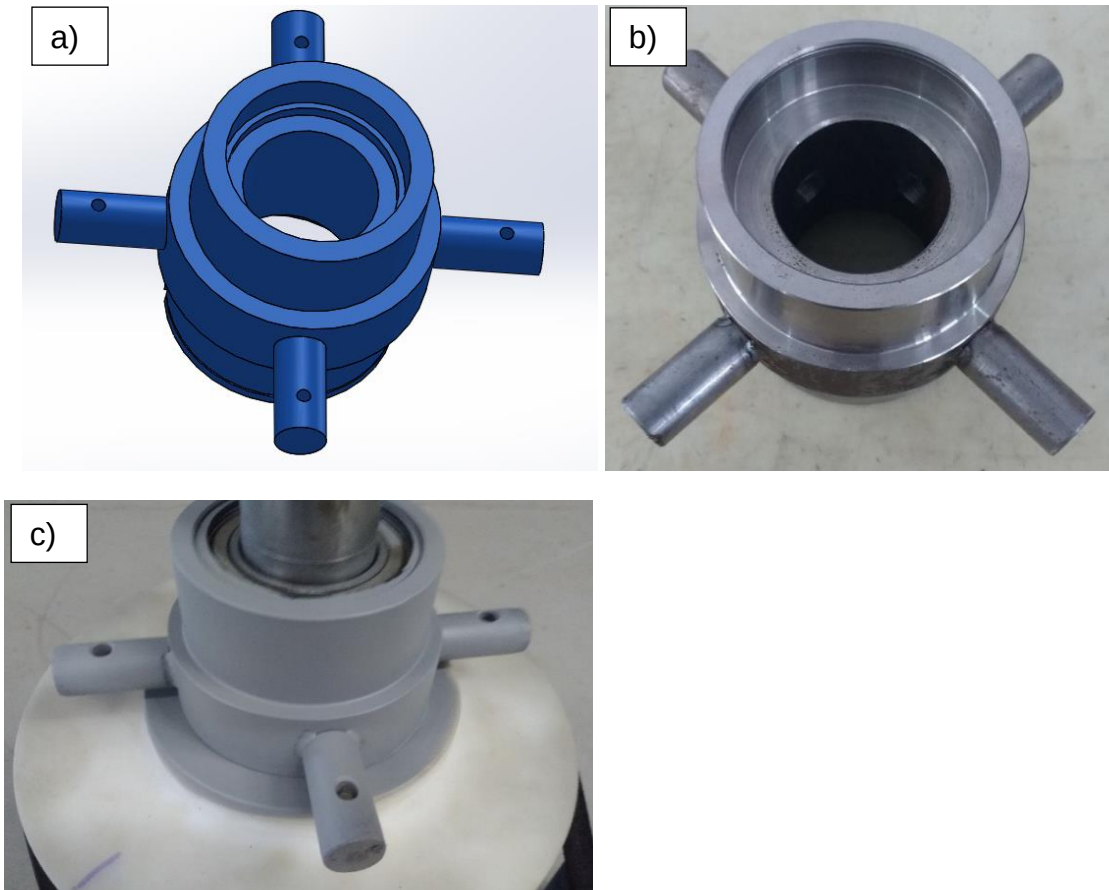


Figura 14 : a) Desenho do rotor inferior do aerogerador; b) imagem do rotor inferior; c) imagem do conjunto do rotor inferior com rolamento
Fonte: do autor

Para garantir que as peças não se desprendam, o conjunto foi fixado por parafusos e porcas de aço M4.

O eixo central da turbina é composto por um tubo de aço carbono SAE 1020, de perfil redondo com dimensões de 1300 mm de comprimento, 50,80 mm de diâmetro, com parede de 5 mm, usinado para acomodar os rolamentos de esfera dos rotores superior e inferior, formando um mancal (Figura 15).

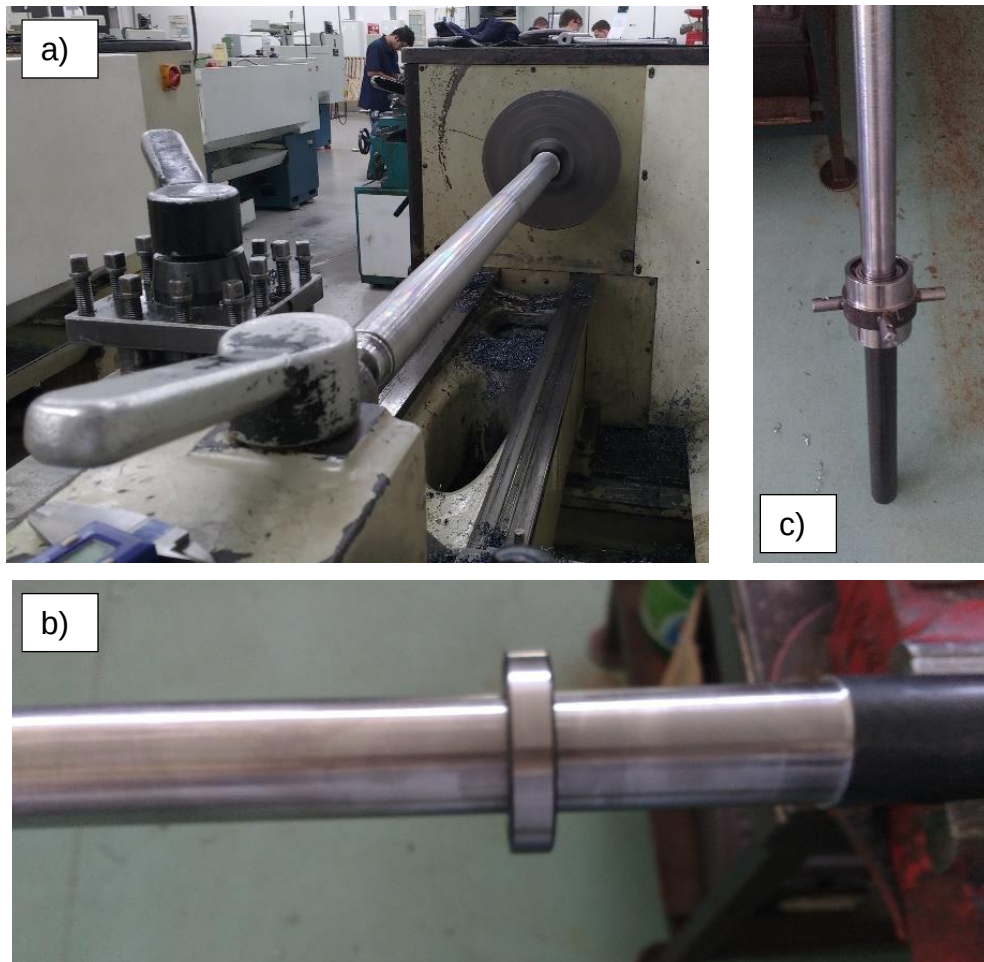


Figura 15: a) Eixo central da turbina; b) Acoplamento do rolamento ao eixo; c) Conjunto rotor inferior acoplado ao eixo
Fonte: do autor

Para proporcionar a movimentação e estabilidade da turbina, diminuindo a vibração, foram acoplados aos rotores dois rolamentos de esfera do tipo 6009zz para o rotor inferior, e um rolamento de esfera do tipo 6007zz, para o rotor superior. (Figura 16).

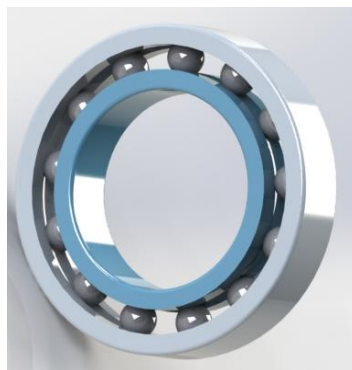


Figura 16: Rolamento de esfera
Fonte: do autor

O conjunto de ampliação de rotação é formado por duas polias de 230mm de diâmetro e 2 polias de 70mm de diâmetro, ligadas por correias A-35 e A-52. Esse conjunto possui uma relação de transformação que totaliza uma ampliação de 10,8 vezes. Conforme figura 17, o conjunto é alinhado e fixado na base por meio de um tubo maciço com diâmetro de 38mm. Para a estabilidade do conjunto foram instalados rolamentos de esfera blindados do tipo 6004zz e 6002zz.

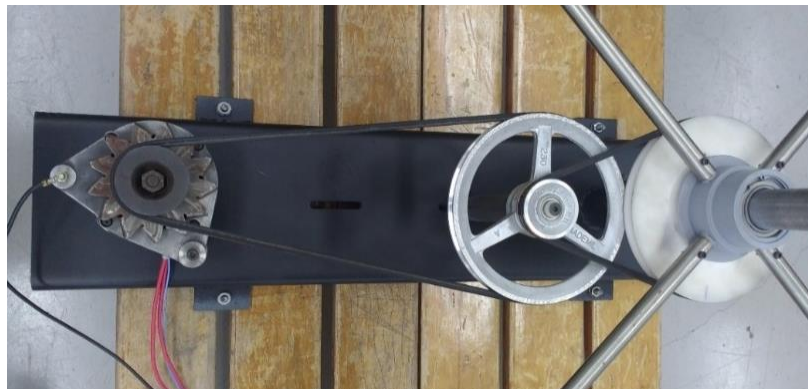


Figura 17 : Conjunto de ampliação de rotação
Fonte: do autor

Conforme figura 17, foi construída uma base para fixação do eixo principal da turbina, do conjunto de ampliação de rotação e do gerador de energia, utilizando uma viga C de aço carbono SAE 1020 com 75mm de altura, 200mm de largura e 980mm de comprimento.

Bateria

Para armazenamento da energia produzida pelo aerogerador, utilizou-se uma bateria automotiva nova de chumbo ácido, com capacidade de 60Ah, modelo M60GE, da Marca Moura (Figura 18).

As baterias mais utilizadas para essa finalidade são geralmente do tipo chumbo-ácido estacionária de descarga profunda, ou seja, podem ser descarregadas entre 20% e 80% de sua capacidade máxima e recarregadas novamente todos os dias. No entanto, neste experimento foi utilizada uma bateria automotiva de chumbo-ácido comum, em razão do menor custo. Entretanto, deve-se

tomar o cuidado de não utilizá-la em ciclos de descarga profundo, para não diminuir drasticamente sua vida útil.



Figura 18 : Modelo de bateria
Fonte: catálogo baterias Moura

Gerador de Energia CA

A unidade geradora escolhida para o desenvolvimento deste trabalho foi um alternador automotivo da marca Bosch, com controlador e retificador de carga de 12V e 45A, para conversão de corrente alternada em corrente contínua. O baixo custo, aliado à facilidade de aquisição, determinaram essa escolha (Figura 19).



Figura 19: Modelo gerador CA tipo alternador automotivo
Fonte: do autor

Banco de resistências

O banco de resistências utilizadas como carga é composto por 20 unidades de resistências de fio de 20W e 15 ohms cada, totalizando 400W de carga máxima teórica, conectadas em paralelo por um fio condutor de #2,5mm² (Figura 20).

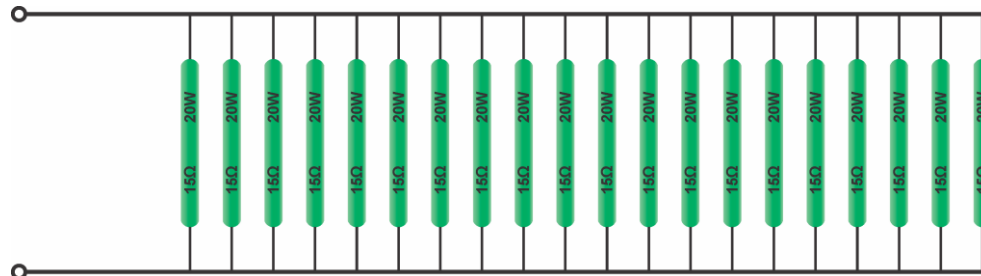


Figura 20: Banco de resistências
Fonte: do autor

Ventilador Axial

Para simular a velocidade do vento, foi utilizado um ventilador exaustor axial, com dimensões de 700mm de diâmetro e 400 mm de profundidade, com motor elétrico de 7,5 cv trifásico de 220V, conforme figura 21.



Figura 21: Ventilador Axial:
Fonte: do autor

3.3 Equipamentos para Testes e Medições

Multímetro

Para realizar as medições de tensão e corrente elétricas, foi utilizado um Multímetro Digital modelo MD-6110 (Figura 22), caracterizado conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações técnicas do Multímetro Digital modelo MD-6110

MD-6110 ESPECIFICAÇÕES	
Fabricante	Minipa Eletrônica
Precisão	+/- 1%
Resistência	200Ω
Tensão DC/AC	1000V / 750V
Corrente DC/AC	20A
Temperatura	-40°C – 1000°C



Figura 22 : Multímetro Digital modelo MD-6110
Fonte: do autor

Alicate Amperímetro Digital

Para realizar as medições de corrente, foi utilizado um Alicate Amperímetro Digital modelo ET- 3990 (Figura 23), caracterizado conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações técnicas do Alicate Amperímetro Digital modelo ET- 3990

ET-3990 ESPECIFICAÇÕES	
Fabricante	Minipa Eletrônica
Precisão	+/- 1%
Resistência	600Ω
Tensão DC/AC	1000V
Corrente DC/AC	2500A
Temperatura	0°C – 50°C



Figura 23: Alicate Amperímetro Digital modelo ET-3990
Fonte: do autor

Termo-Anemômetro

Para realizar as medições da velocidade do vento, foi utilizado um Termo-Anemômetro modelo TAFR-180 (Figura 24), caracterizado conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações técnicas do Termo-Anemômetro modelo TAFR-180

TAFR-180	
ESPECIFICAÇÕES	
Fabricante	Instrutherm
Precisão	$\pm 3\%$
Resolução	0.1 m/s
Velocidade	0.2 a 20.0 m/s
Temperatura	0 a 50°C / 32 a 122°F



Figura 24: Termo-Anemômetro modelo TAFR-180
Fonte: do autor

SDA – Sistema de Análise de Vibração

Para realizar as medições da rotação do alternador, em rpm, foi utilizado um Sistema de Análise de Vibração modelo NK820 (Figura 25), caracterizado conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Especificações técnicas do Sistema de Análise de Vibração modelo NK820

NK820 ESPECIFICAÇÕES	
Fabricante	TEKNIKAO
Precisão	Espectros de frequências com precisão menor que 0,01% em oito faixas de 0,5 Hz a 10 kHz
Resolução	Espectros com resolução de 2k, 4k, 8k e 16k linhas
Sensor Óptico	Sensor Óptico com precisão menor que 0,1% (cabo de 3 metros)



Figura 25: Sistema de Análise de Vibração modelo SDAV-2
Fonte: do autor

Dinamômetro

Para determinação do Torque (Nm) desenvolvido pelo aerogerador foi medida a força (N) exercida na pá, no sentido da rotação, utilizando um dinamômetro digital portátil (Figura 26), caracterizado conforme a Tabela 6.

O Torque é calculado a partir da multiplicação da Força pelo raio do aerogerador ($r=1m$).

Tabela 6 - Especificações técnicas do dinamômetro modelo DD-500

DD-500	
ESPECIFICAÇÕES	
Fabricante	Instrutherm
Capacidade de medição	5Kgf / 176,40 LBf / 49,03 Newton
Resolução	0,1Kgf / 0,05 LBf / 0,01 Newton
Precisão	$\pm (0,4\% + 1 \text{ dígitos})$, dentro de $23 \pm 5^\circ\text{C}$, dentro da escala de 3000 a 5000g
Temperatura	0° a 50°C (32° a 122°F)



Figura 26: Dinamômetro Digital Portátil modelo DD-500
Fonte: do autor

3.4 Metodologia de Testes e Medições

Os testes foram realizados a partir de um ventilador axial que produziu um forte deslocamento de ar (vento), que por sua vez provocou uma rotação no aerogerador, que estava conectado a um alternador, resultando assim, na geração de energia elétrica. Em cada um dos testes foram feitas medições de velocidade do vento (m/s), utilizando-se o termo-anemômetro, rotação do alternador (rpm), o sistema de análise de vibração (SDAV), tensão (V) e corrente (A) entre o alternador e a bateria e entre a bateria e a carga, utilizando-se os multímetros e alicates amperímetros.

Com o intuito de simular diferentes velocidades do vento incidentes no aerogerador, foram demarcadas no piso cinco distâncias entre o aerogerador e o ventilador, de modo que quanto menor a distância entre eles, maior a velocidade do vento recebida pelo aerogerador, e quanto maior a distância, menor a velocidade. Tomou-se o devido cuidado para que, mesmo a menor velocidade do vento (maior distância), a rotação do alternador sempre gerasse energia elétrica, ou seja, permitisse que a bateria fosse carregada. As distâncias foram as seguintes: T1= 0,40 m, T2= 0,65 m, T3= 0,90 m, T4= 1,15 m e T5= 1,40 m. O posicionamento dos equipamentos e as distâncias entre ventilador e aerogerador estão apresentadas na figura 27.

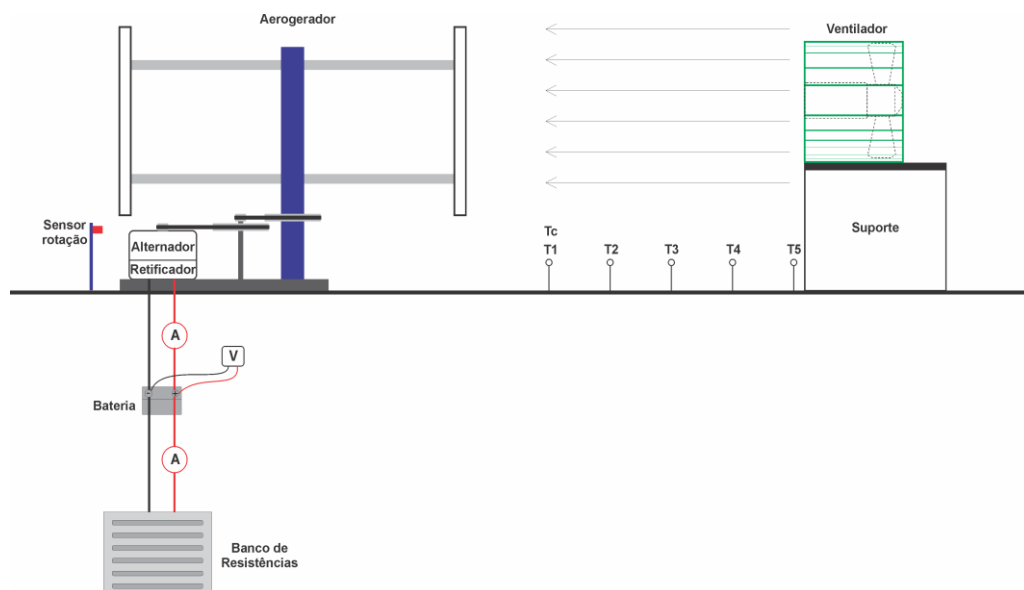


Figura 27: Posicionamento dos instrumentos de medição.
Fonte: do autor

Foram realizados, no total, sete testes (Td, Tc, T1, T2, T3, T4 e T5), descritos a seguir:

O teste de descarga da bateria (Td) foi realizado com a bateria totalmente carregada e o banco de resistências acoplado a ela. Para esse teste foram coletados os seguintes dados: data, hora, tensão entre bateria e carga (V), corrente entre bateria e carga (A), com intervalos de 5 minutos, até que a tensão da bateria se aproximasse do limite de segurança, estimado em 10,5 V.

O teste de carregamento da bateria (Tc) foi realizado com o ventilador na posição T1, que gerou ventos de máxima velocidade, e com a bateria conectada e inicialmente descarregada. Para esse teste foram coletados os seguintes dados: data, hora, velocidade do vento (m/s), rotação do alternador (rpm), tensão entre alternador e bateria (V), corrente entre alternador e bateria (A), com intervalos de 15 minutos.

No teste T1 foram realizadas medições com o aerogerador recebendo velocidade do vento na posição T1 e a bateria acoplada à carga. Esse teste foi repetido durante 30 minutos, com medições a cada 5 minutos. Os dados coletados foram os seguintes: data, hora, velocidade do vento (m/s), rotação do alternador (rpm), tensão entre alternador e bateria (V), corrente entre alternador e bateria (A), tensão entre bateria e carga (V), corrente entre bateria e carga (A).

Nos testes T2 a T5 foram realizadas medições com o aerogerador recebendo velocidades do vento nas posições T2 a T5, respectivamente, e com a bateria acoplada à carga. Os intervalos de medição e os dados coletados foram os mesmos apresentados no teste T1.

As equações utilizadas para compor os resultados foram:

$$\text{Potência Eólica (W): } \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (7)$$

$$\text{Potência Mecânica (W): } \frac{\text{conjugado (Nm)} \times \text{rpm eixo}}{9,555} \quad (8)$$

$$\text{Potência Elétrica de Geração (W): } \text{tensão (V)} \times \text{corrente (A)} \quad (9)$$

$$\text{Eficiência Eólica-Mecânica (%): } \frac{\text{Potência Mecânica (W)}}{\text{Potência Eólica (W)}} 100\% \quad (10)$$

$$\text{Eficiência Mecânica-Elétrica (%): } \frac{\text{Potência Elétrica de Geração (W)}}{\text{Potência Mecânica (W)}} 100\% \quad (11)$$

$$\text{Eficiência Eólica-Elétrica (%): } \frac{\text{Potência Elétrica de Geração (W)}}{\text{Potência Eólica (W)}} 100\% \quad (12)$$

$$\text{Energia (Wh): } \frac{\text{Potência (W)} \times \text{Intervalo tempo medição (min)}}{60} \quad (13)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto aerogerador montado está apresentado na figura 28, que possui uma massa aproximada de 20,70 Kg.



Figura 28: Conjunto Aerogerador Montado
Fonte: do autor

Conforme tabela 7, o conjunto de pás, estrutura, eixo principal, conjunto de ampliação, alternador, bateria, banco de resistências, ou seja, todo o material necessário para geração e testes teve um custo total de fabricação de R\$ 2.215,07.

Tabela 7 - Custos para construção do aerogerador

Qtde	Descrição	Material	Valor (R\$)
1	Base do aerogerador	Viga C em Aço SAE 1020	60,00
2	Parafuso M12 para fixar eixo principal à base	M12	1,50
1	Eixo principal da turbina	Aço SAE 1020 - Usinado	150,00
1	Polia canal A do eixo principal	Diâmetro 230mm em poliacetal	70,00
1	Rotor inferior	Aço SAE 1020 - Usinado	120,00
1	Rotor superior	Aço SAE 1020 - Usinado	60,00
4	Rolamento 6009-ZZ para rotor inferior	Rolamento 6009-ZZ	26,00
1	Rolamento 6007-ZZ para rotor superior	Rolamento 6007-ZZ	23,00
8	Estrutura rotor-pás	Tubo Inox 304 diâmetro 21mmx comprimento 1000mm	200,00
16	Parafuso M4 com porca para fixação estrutura rotor-pás	M4	4,00
8	Chapa para estrutura pás	Chapa SAE 1020 80mm x 1000m	60,00
16	Perfil pás	PEAD 90mm x 380mm	205,00
1	Revestimento pás	Chapa SAE 1020 0,8mm x 1000m x 2000m	86,00
100	Parafusos 4mm para fixação estrutura e revestimento das pás	4mm	15,00
30	Rebite para fechamento acabamento pás	Rebite	8,00
1	Polia canal A do conjunto de ampliação	Alumínio diâmetro 70mm	6,81
1	Polia canal A do conjunto de ampliação	Alumínio diâmetro 230mm	27,92
1	Rolamento 6002-ZZ para polia conjunto de ampliação	Rolamento 6002-ZZ	10,00
1	Rolamento 6004-ZZ para polia conjunto de ampliação	Rolamento 6004-ZZ	13,00
1	Correia Canal A para conjunto de ampliação	A-35	6,14
1	Correia Canal A para conjunto de ampliação	A-52	15,00
1	Suporte conjunto de ampliação	Tubo maciço SAE 1020 diâmetro 38mm x 300mm	30,00
1	Parafuso e arruela M5 para fixação conjunto amplificação	M5	1,20
1	Alternador automotivo usado	Bosch 12V e 45A	200,00
1	Suporte alternador	Tubo maciço SAE 1020 diâmetro 38mm x 300mm	30,00
1	Parafuso M10 para fixação do alternador	M10	1,50
20	Banco de Resistências	Resistência de fio 15 ohms 20W	90,00
1	Bateria 60Ah	Bateria Moura M60GE	439,00
1	Miscelâneas	Fios Cabos e terminais e tinta	50,00
	Montagem do conjunto aerogerador		200,00
	Total conjunto aerogerador		2.215,07

Todos os testes descritos na metodologia foram realizados no sistema de geração eólica, e os resultados são apresentados nas tabelas 8 e 9, a seguir:

Tabela 8 - Dados adquiridos nos Testes T1 a T5

[a] Teste	[b] Vel. Vento (m/s)	[c] Rotação do eixo (rpm)	[d] Rotação alterna- dor (rpm)	[e] Tensão alter- bateria (V)	[f] I alter- bateri a (A)	[g] Potência Geração (W)	[h] Tensão bateria- carga (V)	[i] I bateria- carga (A)	[j] Conjugado N.m (R=1m)
T1	8,82	71,57	772,61	9,68	1,21	11,09	9,68	12,51	3,03
T2	9,59	74,14	800,36	10,62	0,86	8,85	10,62	13,03	3,46
T3	8,46	77,25	834,02	11,45	0,55	6,26	11,45	14,27	3,73
T4	8,54	78,08	842,94	11,79	0,67	7,90	11,79	14,60	4,21
T5	7,36	79,92	862,85	12,11	0,80	9,70	12,11	15,13	6,46
Média	8,55	76,19	822,56	11,13	0,82	8,76	11,13	13,91	4,18

De acordo com a tabela 8, a coluna A indica os testes realizados.

Na coluna B apresenta-se os dados referente às velocidades médias do vento medidas nos testes T1 a T5 e adquiridas com a utilização do termo-anemômetro.

Na coluna C apresenta-se os dados referente às rotações médias do eixo principal da turbina e foi calculada com base nas rotações do alternador e no fator de multiplicação do conjunto de ampliação constituído por polias.

Na coluna D apresenta-se os dados referente às rotações médias do alternador adquiridas com a utilização do analisador de vibração modelo NK820.

Na coluna E apresenta-se os dados referente às tensões média entre o alternador e a bateria, adquiridas com a utilização do Alicate Amperímetro Digital modelo ET-3990 na configuração de teste de tensão.

Na coluna F apresenta-se os dados referente às correntes (I) médias entre o alternador e a bateria, adquiridas com a utilização do Multímetro Digital modelo MD-6110 na configuração de teste de corrente.

Na coluna G apresenta-se os dados referente às médias da potência elétrica de geração, calculadas a partir das tensões médias e as correntes (I) médias entre o alternador e a bateria.

Na coluna H apresenta-se os dados referente às tensões médias entre a bateria e a carga, adquiridas com a utilização do Alicate Amperímetro Digital modelo ET-3990 na configuração de teste de tensão.

Na coluna I apresenta-se os dados referente às correntes (I) médias entre a bateria e a carga, adquirida com a utilização do Alicat Amperímetro Digital modelo ET-3990.

Na coluna J apresenta-se os dados referente às o torque médio do conjugado. Os dados foram obtidos a partir das medições feitas com o dinamômetro digital portátil fixado em uma estrutura por cintas plásticas e a pá do aerogerador foi presa por um cabo.

Tabela 9 - Potências e Eficiência do Conjunto Aerogerador

[a] Teste	[b] Velocidade Média do Vento	[c] Potência Eólica (W)	[d] Potência Mecânica (W)	[e] Potência Elétrica de Geração (W)	[f] Eficiência Eólica- Mecânica (%)	[g] Eficiência Mecânica- Elétrica (%)	[h] Eficiência Total Eólica- Elétrica (%)
T1	8,82	839,08	22,69	11,09	2,70	48,87	1,32
T2	9,59	1080,42	26,85	8,85	2,48	32,98	0,82
T3	8,46	741,73	30,16	6,26	4,07	20,76	0,84
T4	8,54	762,30	34,40	7,90	4,51	22,98	1,04
T5	7,36	488,49	54,04	9,70	11,06	17,96	1,99
Média	8,55	782,41	33,63	8,76	4,30	26,06	1,12

Conforme tabela 9, a coluna A indica os testes realizados.

Na coluna B apresenta-se os dados referente às velocidades médias do vento nos testes T1 a T5 adquiridas com a utilização do Termo-anemômetro.

Na coluna C apresenta-se os dados referente às potências eólicas média dos testes de T1 a T5, calculadas utilizando a velocidade média do vento aplicada a equação (1).

Na coluna D apresenta-se os dados referente às potências mecânicas média dos testes T1 a T5 calculadas a partir da rotação do eixo principal e do conjugado desenvolvido pelo aerogerador.

Na coluna E apresenta-se os dados referente às potências elétricas média de geração de energia elétrica dos testes T1 a T5 calculadas com base nas tensões médias em (V) e as correntes médias (I) em (A) medidas entre o alternador e a bateria.

Na coluna F apresenta-se os dados referente à eficiência eólica mecânica média dos testes T1 a T5 calculada pela potência eólica e a potência mecânica.

Na coluna G apresenta-se os dados referente à eficiência mecânica elétrica média dos testes T1 a T5 calculada a partir da potência mecânica e a potência elétrica de geração.

Na coluna H apresenta-se os dados referente à eficiência total eólica elétrica média dos testes T1 a T5 calculada a partir da potência eólica e a potência elétrica de geração.

Ao observar a figura 29, pode-se estabelecer um comparativo entre a velocidade do vento e os totais das energias produzida, fornecida e gerada nos testes T1 a T5. A energia total consumida pela carga para cada teste (Wh), identificada como ETC, é resultante da somatória da energia total produzida pelo aerogerador para cada teste (Wh), identificado com ETA, e da energia total fornecida pela bateria para cada teste (Wh), identificada como ETB. A maior energia ocorreu com velocidade do vento média de 7,37 (m/s) e a menor energia ocorreu com velocidade do vento média de 8,82 m/s.

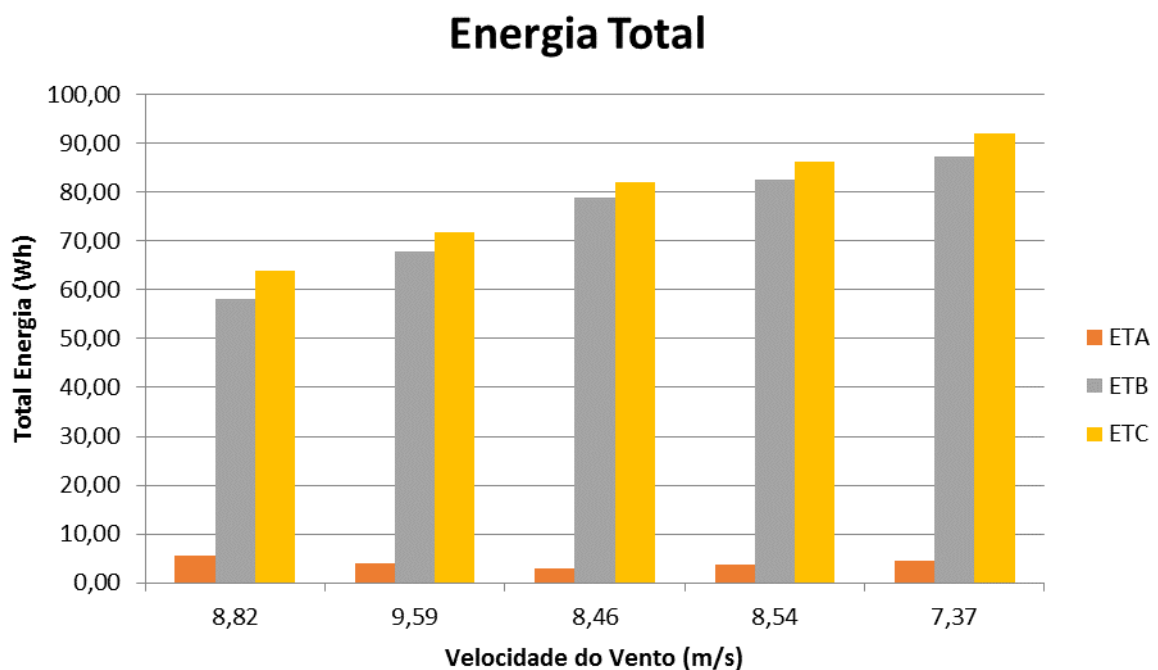


Figura 29: Energia Total
Fonte: do autor

Ao observar a figura 30, pode-se estabelecer um comparativo entre a média da velocidade do vento e a potência média gerada pelo aerogerador nos testes T1 a T5. A maior potência gerada ocorreu com velocidade do vento média de 8,82 (m/s) e

a menor energia ocorreu com velocidade do vento média de 8,46 m/s. A expectativa seria a obtenção de uma curva ascendente, considerando que à medida que se aumenta a velocidade do vento, aumenta a potência gerada. No entanto, acredita-se que a curva não apresentou essa característica devido à variação da turbulência do vento que ocorre em função das diferentes distâncias utilizadas.

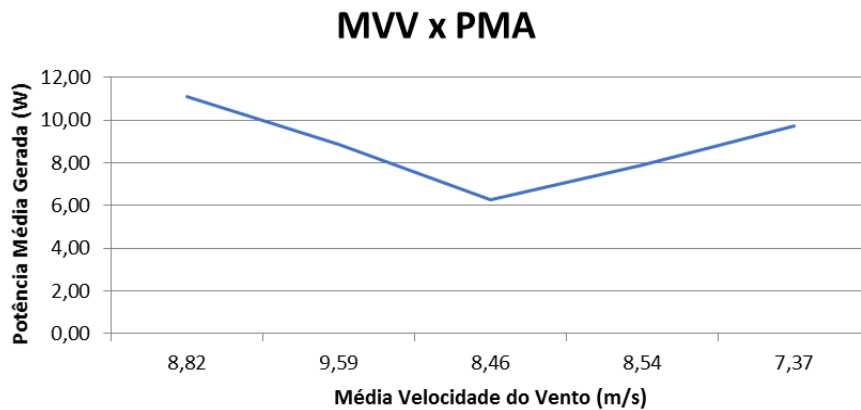


Figura 30: Média Velocidade do Vento x Potência Média Alternador
Fonte: do autor

Na figura 31, é exibido um comparativo entre a média da velocidade do vento e a média da rotação do alternador nos testes T1 a T5. A menor rotação ocorreu com a velocidade do vento média de 8,82 (m/s) e a maior rotação foi alcançada com velocidade do vento média de 7,37 m/s.

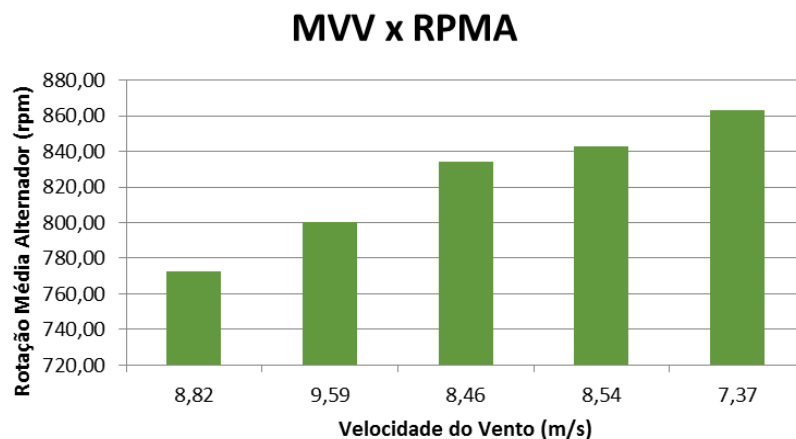


Figura 31: Média Velocidade do Vento x Rotação do Alternador
Fonte: do autor

Na figura 32, apresenta-se a relação entre tensão da bateria com o período dos testes T1 a T5. Observa-se que há uma tendência de diminuição da tensão da bateria ao longo do tempo.

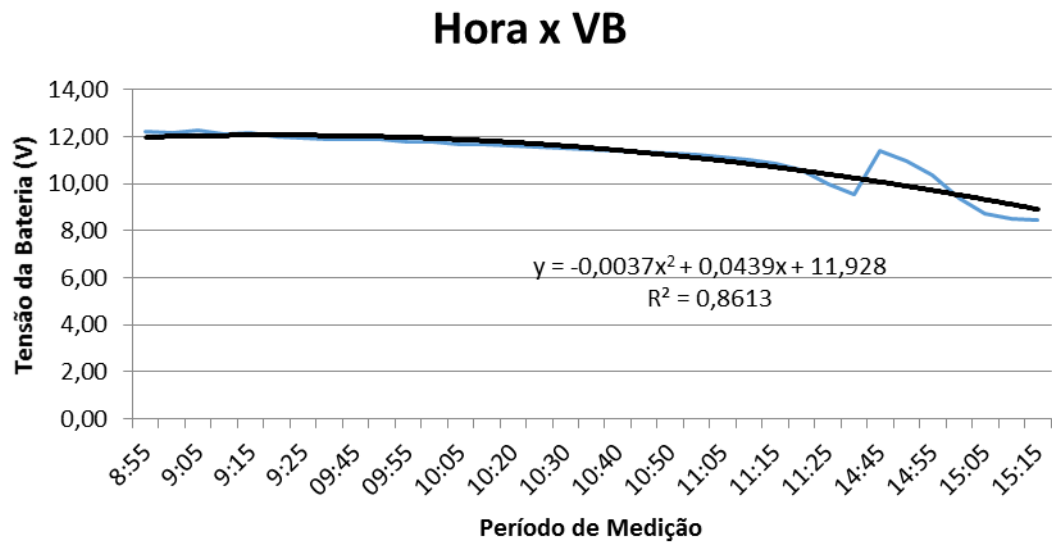


Figura 32: Horas x Tensão da Bateria nos testes T1 a T5.
Fonte: do autor

Observa-se na figura 33 um aumento gradativo da energia acumulada armazenada na bateria ao longo do período de, no teste de carregamento (Tc) realizado. No início do período de teste ocorre o menor acúmulo de energia armazenada na bateria e no final do período de teste ocorre o maior acúmulo de energia armazenada na bateria.

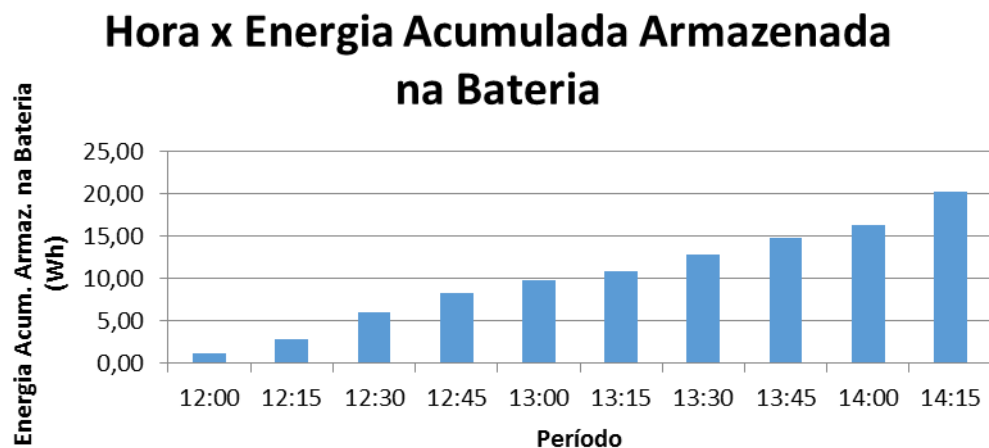


Figura 33: Horas x Energia Acumulada Armazenada na Bateria.
Fonte: do autor

Observa-se na figura 34 uma relação entre a tensão da bateria e o período de tempo em que o teste de carregamento da bateria (Tc) foi realizado. Houve um aumento da tensão ao final do teste. Foi gerada uma curva de tendência para melhor representar este aumento de tensão.

Hora x Tensão da Bateria

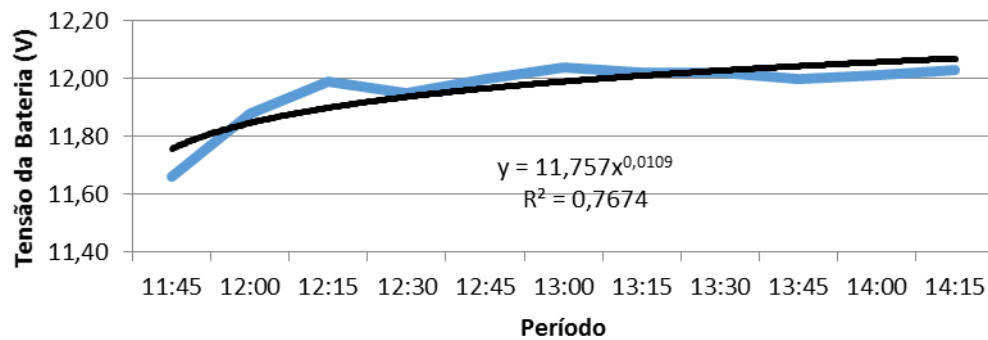


Figura 34: Hora x Tensão da Bateria em Carregamento.
Fonte: do autor

Observa-se na figura 35 uma relação entre a energia acumulada fornecida pela bateria e o período de tempo medido no teste. Houve um aumento gradativo da energia acumulada fornecida pela bateria.

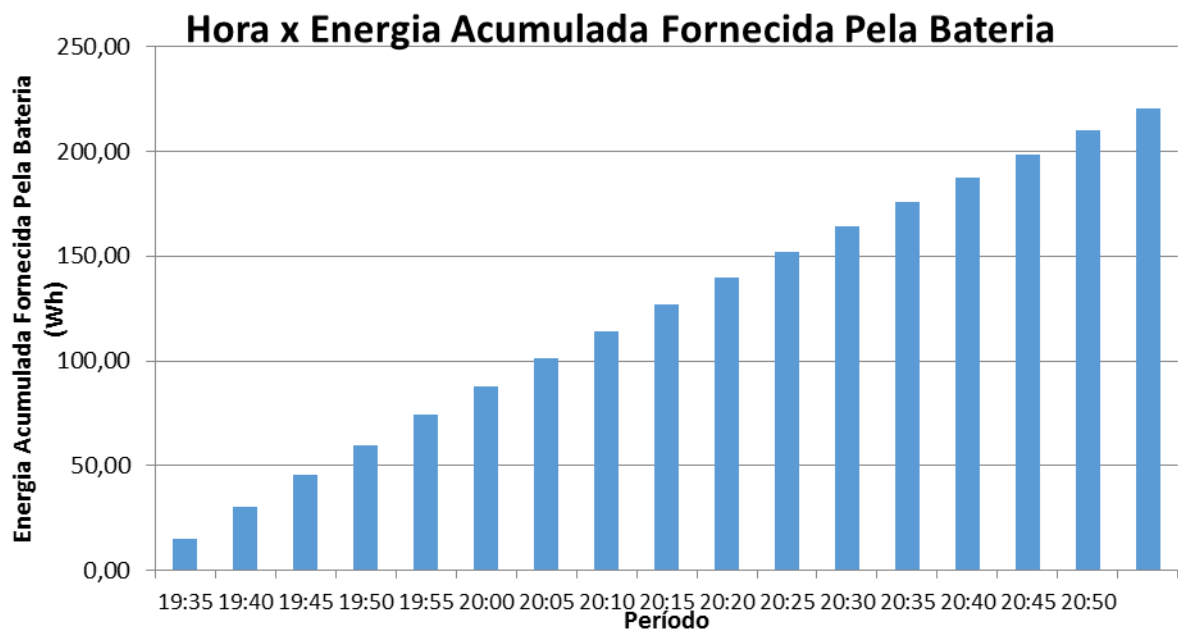


Figura 35: Horas x Energia Acumulada Fornecida Pela Bateria.
Fonte: do autor

A figura 36 apresenta o comportamento da tensão da bateria em relação com o período do teste de descarga da bateria (TD). Observa-se que há uma diminuição gradativa da tensão da bateria. Foi gerada uma curva de tendência para facilitar a compreensão.

Hora x Tensão da Bateria

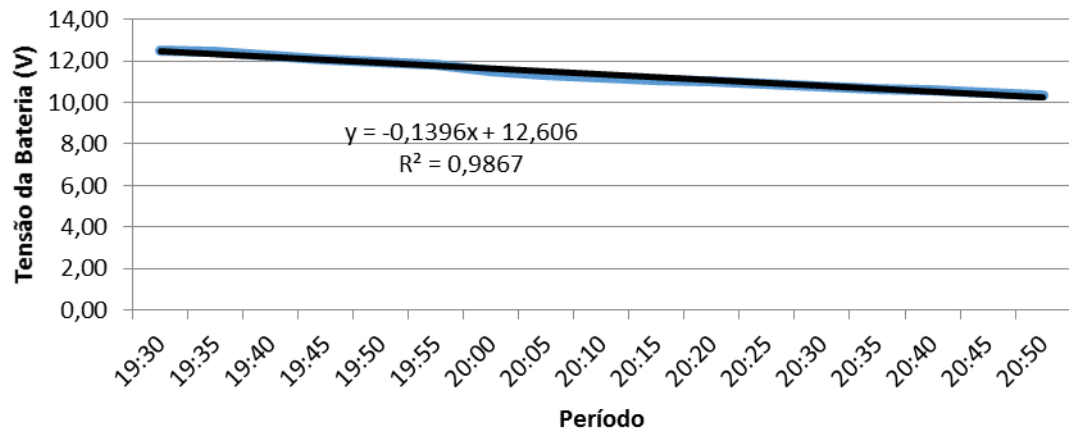


Figura 36: Horas x Tensão da Bateria em Descarga.
Fonte: do autor

Eficiência Eólica-Mecânica

Na figura 37, são representados os valores das médias da eficiência eólica mecânica em relação à velocidade do vento dos testes T1 a T5, observa-se que a maior eficiência ocorreu com ventos de velocidade de 7,36 m/s e menor eficiência ocorreu com ventos de velocidade de 9,59 m/s.

Eficiência Eólica-Mecânica x Velocidade Vento

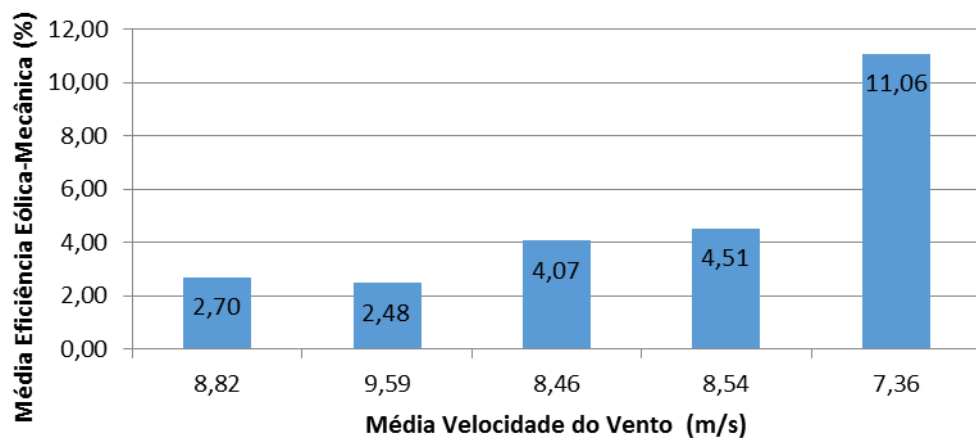


Figura 37: Eficiência Eólica-Mecânica
Fonte: do autor

Eficiência Mecânica-Elétrica

Na figura 38, são representados os valores das médias da eficiência mecânica elétrica em relação à velocidade do vento dos testes T1 a T5, observa-se

que a maior eficiência ocorreu com ventos de velocidade de 8,82 m/s e a menor eficiência ocorreu com ventos de velocidade de 7,36 m/s.

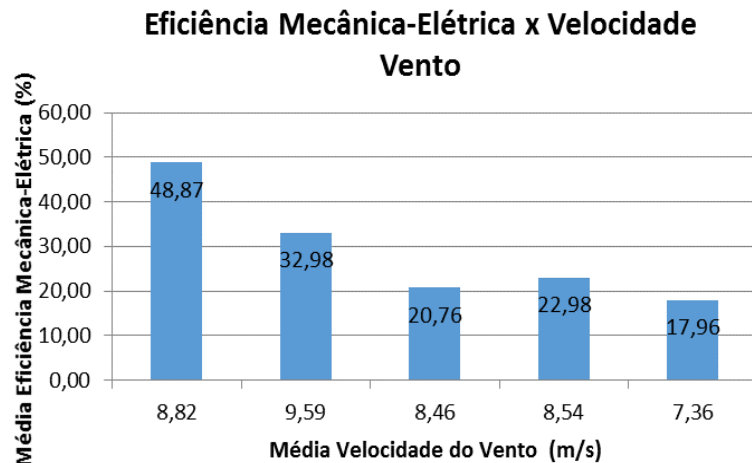


Figura 38: Eficiência Mecânica-Elétrica
Fonte: do autor

Eficiência Total Eólica-Elétrica

Na figura 39, são representados os valores das médias da eficiência eólica elétrica da geração de energia em relação à velocidade do vento dos testes T1 a T5, observa-se que a maior eficiência ocorreu com ventos de velocidade de 7,36 m/s e a menor eficiência ocorreu com ventos de velocidade de 9,59 m/s.

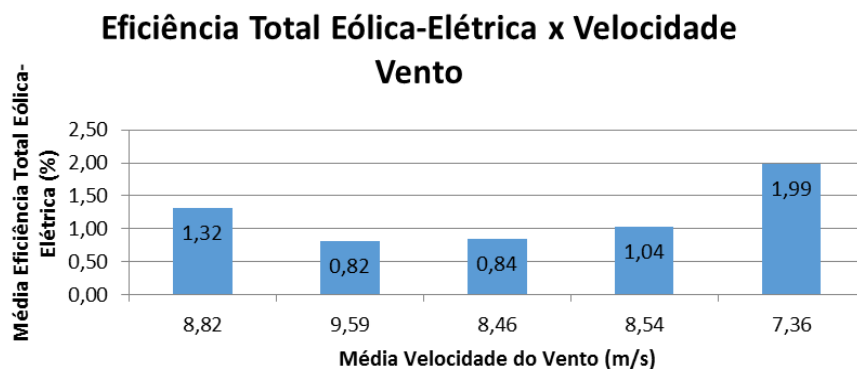


Figura 39: Eficiência Eólica-Elétrica
Fonte: do autor

Na figura 40, são representados os valores das médias das eficiências eólica-mecânica, mecânica-elétrica e eficiência total eólica-elétrica, observa-se que a maior eficiência ocorreu no conjunto mecânico-elétrico com 26,06 % e a menor eficiência ocorreu no conjunto eólico-elétrico com 1,12 %. Estes dados foram obtidos a partir dos dados descritos anteriormente.

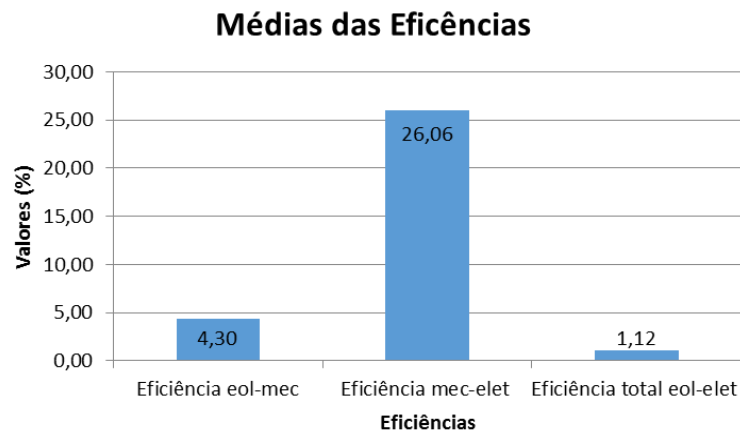


Figura 40: Médias das Eficências
Fonte: do autor

A figura 41 apresenta um aerogerador de eixo vertical que utiliza um rotor com ímãs permanentes com expectativa de potência de 500 W e com rotor de 2,00 m de diâmetro desenvolvido em Nairobi, Kenya (HAROUB, 2015). Por possuir dimensões e características próximas ao projeto desenvolvido, foi realizada uma comparação de velocidade do vento, rotação e potência.

Com a velocidade do vento de 8 m/s, o aerogerador gerou uma potência de 96 W e atingiu uma rotação de 140 rpm. O projeto desenvolvido com média de velocidade de ventos de 8,55 m/s gerou uma potência média de 8,76 W, e o eixo do alternador atingiu uma rotação média de 822,56 rpm.

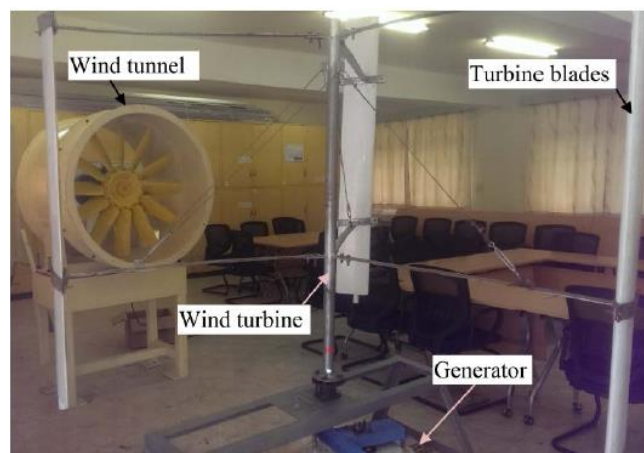


Figura 41: Aerogerador de eixo vertical
Fonte: Haroub -2015

4. CONCLUSÃO

Após os testes realizados no protótipo de um aerogerador de eixo vertical, o qual apresentou uma eficiência eólica-mecânica referente ao conjunto turbina-alternador média de 4,30% e uma eficiência mecânica-elétrica referente ao conjunto alternador-gerador média de 26,06 %. A eficiência de geração de energia eólica-elétrica total do conjunto foi em média de 1,12 %. Após a análise dos dados, conclui-se que o conjunto aerogerador sugerido possui baixa eficiência, devido ao conjunto de geração, por meio de alternador automotivo, controlar a carga da bateria.

Nos testes foram observados os limites de carregamento da bateria, que chegou a uma estabilidade de carregamento próxima de 12 V, e uma corrente média de 0,67 A. Os dados obtidos nos testes T1 a T5 apresentaram uma média de velocidade do vento de 8,55 m/s. O alternador teve uma rotação média de 822,56 rpm, a tensão média da bateria foi de 11,13 V e a corrente média foi de 0,82 A, que gerou uma potência elétrica média de 8,76 W. O protótipo do aerogerador de eixo vertical totalizou um custo de R\$ 2.215,07 (dois mil duzentos e quinze reais e sete centavos).

O objetivo de desenvolver um modelo de aerogerador de eixo vertical foi alcançado, porém, para melhorar sua eficiência, são sugeridas algumas ações que poderão ser realizadas em trabalhos futuros, tais como: substituir o alternador por um gerador de corrente contínua; modificar o alternador utilizado, colocando-se ímãs permanentes no rotor semelhante ao utilizado por Haroub; utilizar inversor de frequência acoplado ao ventilador, para controlar melhor a velocidade do vento; utilizar outros materiais construtivos, que possam reduzir o peso e o custo do aerogerador; e ainda utilizar outros modelos de pás.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR IEC 61400-1. **Aerogeradores Parte 1: Requisitos de projetos**, 2008.

ALDABÓ, R. L. **Energia eólica**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2002.

AMARANTE, O. A. C. et al. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, DF: MME, 2001.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> Acesso em: 04 Abr 2013.

BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2007.

BARBOSA. **Os 10 países líderes em energia eólica**. Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/energia/10-paises-lideres-energia-eolica-676876.shtml>> Acesso em: 02 Mai 2016.

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.

BHUTTA, M. M. A., HAYAT N., FARROQ A. U., ALI Z., JAMIL S. R., HUSSAIN Z. **Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012) journal home page: www.elsevier.com/locate/rser Acesso em: Set 2015.

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento** – Editora Elsevier, 2009.

BORGA, M., COLLUA, M., BRENNANA, F. P. **Use of a wave energy converter as a motion suppression device for floating wind turbines**, Trondheim, Norway, 24-25 January, DeepWind'2013.

CARMO, D. M. F. G. M. **Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical para aplicação em meio urbano** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2012.

CATÁLOGO LINHA ELÉTRICA BOSCH. Disponível em: http://br.bosch-automotive.com/midia/parts/download_2/motores_eletricos/Cat_Linha_Eletrica_RM_2015-2016_LowRes.pdf Acesso: 10 jan. 2017.

COX, K., ECHTERMEYERB A. **Structural design and analysis of a 10MW wind turbine blade** - DeepWind, 19-20 January 2012, Trondheim, Norway.

CRESESB - **Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. FAQ Eólica (Perguntas frequentes).** Disponível em: <www.cresesb.cepel.br/content.php> Acesso em: Fev 2016.

DA COSTA, M. A. F., DA COSTA, M. F. B. **Projeto de Pesquisa – Entenda e Faça** – Editora Vozes, 2011.

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas** – Editora LTG, 2013.

DO FUNDO, R. C. F. **Projeto de um aerogerador de eixo horizontal**, Graduação (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

DUARTE, P. A. S. C. **Interface de um gerador eólico de pequena potência com a rede eléctrica.** 2010. [Dissertação Mestrado]. Universidade do Minho, 2010, Braga.

FENG, F., LI, S., LI, Yan, XU, Dan. **Torque Characteristics Simulation on Small Scale Combined Type Vertical Axis Wind Turbine** –International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering, 2012.

FIROZ A., GOLDEB S. **An aerodynamic study of a micro scale vertical axis wind turbine** - 5th BSME International Conference on Thermal Engineering Procedia Engineering 56 (2013) 568 – 572.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY C. JR, UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas – com introdução à eletrônica de potência** – 6ª ed. Editora Bookman, 2006.

HAROUB A.H, OCHIENG F.X, KAMAU J.N. **Development of a Low Cost Rotor Blade for a H - Darrieus Wind Turbine** - Journal of Sustainable Research in Engineering Vol. 2 (3) 2015, 92-99.

HOSSAIN, A., SINGH, R., CHOUDHURY, I. A., BAKAR, A. **Energy efficient wind turbine system based on fuzzy control approach** - 5th BSME International Conference on Thermal Engineering, Procedia Engineering 56 (2013) 637 – 642.

LINHA MINIPA. Disponível em: <http://www.minipa.com.br/Content/img/Catalogos/Arquivo/catalogo.pdf> Acesso: 01 jun. 2016.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 1, p.1304-1 a 1304-13, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica> . Acesso em 10 dez. 2015.

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

NOBILE, R., VAHDATI, M., BARLOW, J. F. - **Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study**, Anthony Mewburn-Crook d (2014).

PANESI, A. R. Q. **Fundamentos de Eficiência Energética** – Editora Ensino Profissional, 2006.

PARIZOTTO, R. R. **Instalação e avaliação de um sistema de bombeamento d'água com aerogerador de pequeno porte para propriedades rurais, na cidade de Cascavel-PR** Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Pós-Graduação - UNIOESTE – Cascavel, PR, 2014.

PINTO, Milton Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2014.

RABE. J. **Energia eólica no mundo cresce de vento em popa**. Disponível em: <<http://www.dw.de/dw/article/0,,6365833,00.html>>. Acesso em: 10 Jun 2016.

RAMOS F.G; SEIDLER, N. **Estudo da energia eólica para aproveitamento em pequenos empreendimentos**. Disponível em: <<http://www.reitoria.uri.br>> Acesso em: 10 Jun 2016.

ROSSI H. P.; OLIVEIRA. P. C. Disponível em <http://www.pucrs.br/ce-eolica/publica_2010.php> Acesso em: 14 Abr 2013.

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

SIMAS, M., PACCA, S. **Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável** - Estudos Avançados, ISSN 0103-4014, vol.27 no.77 São Paulo, 2013.

SVENDSEN, H. G., MERZ, K. O. **Control System for Start-up and Shut-down of a Floating Vertical Axis Wind Turbine**, SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway Energy Procedia 35 (2013) 33 – 42.

TEDESCO, H. **Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potência convertida de uma turbina eólica de eixo vertical**, Graduação (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, POA, 2015.

TJIU, W., MAT, S., RUSLAN, M. H., SOPIAN, K. **Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations** – Renewable Energy journal homepage: www.elsevier.com/locate/renene, 2014. Acesso em: 17 Set 2015.

TORRESI, M., DE BENEDITTIS F. A., FORTUNATO, B., CAMPOREALE S. M.
Performance and flow field evaluation of a Savonius rotor tested in a wind tunnel – 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013.

APÊNDICE

Dados adquiridos no Teste T1

Hora	Teste	Vel Vento (m/s)	RPM eixo	RPM alternador	V(alter-bateria)	I(alter-bateria)	Potência Geração	V (bateria-carga)	I (bateria-carga)
14:45	T1	9,60	75,34	813,40	11,37	0,31	3,52	11,37	14,20
14:50	T1		70,36	759,59	10,96	0,59	6,47	10,96	14,00
14:55	T1	8,80	75,09	810,71	10,36	0,80	8,29	10,36	13,80
15:00	T1		68,95	744,36	9,39	1,74	16,34	9,39	12,00
15:05	T1	8,36	69,71	752,60	8,72	2,17	18,92	8,72	11,50
15:10	T1		72,60	783,74	8,51	1,67	14,21	8,51	11,20
15:15	T1	8,50	68,90	743,88	8,44	1,17	9,87	8,44	10,90
	Média	8,82	71,57	772,61	9,68	1,21	11,09	9,68	12,51

Dados adquiridos no Teste T2

Hora	Teste	Vel Vento (m/s)	RPM eixo	RPM alternador	V(alter-bateria)	I(alter-bateria)	Potência Geração	V (bateria-carga)	I (bateria-carga)
11:00	T2	8,64	76,24	823,07	11,21	0,46	5,16	11,21	13,90
11:05	T2		71,48	771,68	11,13	0,58	6,46	11,13	13,80
11:10	T2	9,83	74,22	801,25	11,00	0,51	5,61	11,00	13,40
11:15	T2		76,84	829,56	10,86	0,62	6,73	10,86	13,40
11:20	T2	9,47	73,66	795,19	10,59	0,74	7,84	10,59	13,00
11:25	T2		72,35	781,10	10,00	1,52	15,20	10,00	12,10
11:30	T2	10,42	74,17	800,70	9,54	1,57	14,98	9,54	11,60
	Média	9,59	74,14	800,36	10,62	0,86	8,85	10,62	13,03

Dados adquiridos no Teste T3

Hora	Teste	Vel Vento (m/s)	RPM eixo	RPM alternador	V(alter-bateria)	I(alter-bateria)	Potência Geração	V (bateria-carga)	I (bateria-carga)
10:20	T3	7,06	77,80	839,92	11,62	0,23	2,67	11,62	14,30
10:25	T3		78,13	843,46	11,58	0,19	2,20	11,58	14,30
10:30	T3	10,11	79,11	854,04	11,50	0,49	5,64	11,50	14,30
10:35	T3		77,95	841,54	11,45	0,64	7,33	11,45	14,30
10:40	T3	8,60	75,14	811,25	11,39	0,92	10,48	11,39	14,30
10:45	T3		74,79	807,39	11,35	0,74	8,40	11,35	14,20
10:50	T3	8,07	77,86	840,57	11,29	0,63	7,11	11,29	14,20
	Média	8,46	77,25	834,02	11,45	0,55	6,26	11,45	14,27

Dados adquiridos no Teste T4

Hora	Teste	Vel Vento (m/s)	RPM eixo	RPM alternador	V(alter-bateria)	I(alter-bateria)	Potência Geração	V (bateria-carga)	I (bateria-carga)
09:40	T4	8,90	83,67	903,34	11,90	0,38	4,52	11,90	14,70
09:45	T4		77,16	833,02	11,86	0,34	4,03	11,86	14,70
09:50	T4	7,75	73,69	795,60	11,86	0,77	9,13	11,86	14,70
09:55	T4		76,25	823,23	11,80	1,00	11,80	11,80	14,60
10:00	T4	8,39	80,34	867,36	11,75	0,42	4,94	11,75	14,50
10:05	T4		77,91	841,13	11,68	0,87	10,16	11,68	14,50
10:10	T4	9,11	77,52	836,90	11,68	0,92	10,75	11,68	14,50
	Média	8,54	78,08	842,94	11,79	0,67	7,90	11,79	14,60

Dados adquiridos no Teste T5

Hora	Teste	Vel Vento (m/s)	RPM eixo	RPM alternador	V(alter-bateria)	I(alter-bateria)	Potência Geração	V (bateria-carga)	I (bateria-carga)
8:55	T5	7,29	80,77	871,97	12,20	0,41	5,00	12,20	15,30
9:00	T5		74,46	803,82	12,18	0,68	8,28	12,18	15,30
9:05	T5	8,24	81,06	875,09	12,25	1,12	13,72	12,25	15,30
9:10	T5		83,06	896,69	12,08	0,87	10,51	12,08	14,90
9:15	T5	7,03	77,47	836,34	12,14	1,01	12,26	12,14	15,10
9:20	T5		78,99	852,72	11,98	0,49	5,87	11,98	15,10
9:25	T5	6,88	83,67	903,34	11,92	1,03	12,28	11,92	14,90
	Média	7,36	79,92	862,85	12,11	0,80	9,70	12,11	15,13

Dados adquiridos no Teste de Carregamento (Tc)

Hora	Teste	RPM eixo	RPM alternador	V(alter-bateria)	I(alter-bateria)	Potência Geração
11:45	Tc	77,67	838,53	11,66	0,40	4,66
12:00	Tc	78,94	852,18	11,88	0,59	7,01
12:15	Tc	82,68	892,62	11,99	1,04	12,47
12:30	Tc	77,76	839,49	11,95	0,76	9,08
12:45	Tc	77,86	840,60	12,00	0,52	6,24
13:00	Tc	79,00	852,89	12,04	0,35	4,21
13:15	Tc	78,62	848,80	12,02	0,66	7,93
13:30	Tc	81,41	878,88	12,02	0,61	7,33
13:45	Tc	81,25	877,17	12,00	0,52	6,24
14:00	Tc	79,40	857,18	12,01	1,31	15,73
14:15	Tc	79,52	858,49	12,03	0,66	7,94
	Média	79,46	857,89	11,96	0,67	8,08

Dados adquiridos no Teste de Descarga (Td)

Hora	Teste	V (bateria-carga)	I (bateria-carga)
19:30	Td	12,50	14,80
19:35	Td	12,41	14,70
19:40	Td	12,23	14,60
19:45	Td	12,08	14,40
19:50	Td	11,97	14,30
19:55	Td	11,85	13,90
20:00	Td	11,52	13,90
20:05	Td	11,34	13,70
20:10	Td	11,21	13,70
20:15	Td	11,09	13,50
20:20	Td	11,03	13,50
20:25	Td	10,92	13,30
20:30	Td	10,79	13,10
20:35	Td	10,67	12,90
20:40	Td	10,56	12,90
20:45	Td	10,45	12,70
20:50	Td	10,32	12,70
	Média	11,35	13,68

Média dos Testes

Testes	Média Vel. Vento (m/s)	Eficiência eol-mec (%)	Eficiência mec-elet (%)	Eficiência total eol-elet (%)
T1	8,82	2,70	48,87	1,32
T2	9,59	2,48	32,98	0,82
T3	8,46	4,07	20,76	0,84
T4	8,54	4,51	22,98	1,04
T5	7,36	11,06	17,96	1,99