

ROSEMAR CRISTIANE DAL PONTE

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM AEROGERADOR DE
EIXO VERTICAL UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE GERADORES
ELÉTRICOS

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO/ 2018

ROSEMAR CRISTIANE DAL PONTE

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM AEROGERADOR DE
EIXO VERTICAL UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE GERADORES
ELÉTRICOS

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
MARÇO/ 2018

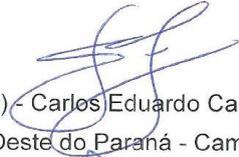
Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Sistema de Bibliotecas - UNIOESTE)

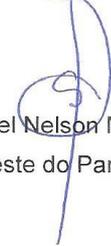
D138a	<p>Dal Ponte, Rosemar Cristiane.</p> <p>Avaliação técnico-econômica de um aerogerador de eixo vertical utilizando diferentes tipos de geradores elétricos / Rosemar Cristiane Dal Ponte. --- Cascavel (PR), 2018. 69 f. il.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira. Coorientador: Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2018, Programa de Pós-Graduação Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura. Inclui Bibliografia</p> <p>1. Energia eólica. 2. Energia – Fontes Alternativas. 3. Energia – Sistema de geração. I. Nogueira, Carlos Eduardo Camargo. II. Siqueira, Jair Antônio Cruz. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.41</p>
-------	---

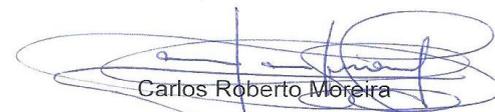
ROSEMAR CRISTIANE DAL PONTE

“AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE GERADORES ELÉTRICOS”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra 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)


Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Carlos Roberto Moreira
Faculdade Assis Gurgacz – Cascavel (FAG)

Cascavel, 9 de março de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial ao meu esposo, Enerdan Fernando Dal Ponte pelo apoio, incentivo e principalmente por se fazer presente em todas as etapas da montagem do experimento.

Especialmente ao meu orientador Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira, por todo tempo dispendido, atenção, auxílio, confiança e incentivo.

Ao meu coorientador Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira, pela troca de informações que contribuíram para desenvolvimento do conhecimento.

Ao SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, que permitiu a utilização do espaço físico possibilitando a realização dos testes do projeto de pesquisa.

A empresa Hércules Componentes Elétricos e a Cooperativa Cotriguaçu, em especial Celio Valmorbida, que disponibilizaram alguns equipamentos necessários para a realização das medições.

Aos colegas do SENAI, em especial ao professor Wagner Gaspar Corbari, que contribuiu com um dos motores utilizados, aos professores Álvaro Leonel R. da Rosa Júnior, Ademiro Alves da Rocha e Daniel Tonello, pela troca de informações que contribuíram no desenvolvimento do projeto.

Ao amigo Ilso Dalpizzol da empresa Centur Usinagem, que contribuiu com sua experiência na área metalmeccânica e na realização das adequações necessárias do projeto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	3
Figura 2 - Distribuição geral dos ventos	4
Figura 3 - Mapa de ventos do Brasil.....	5
Figura 4 - Funcionamento do aerogerador	7
Figura 5 - Turbina de eixo horizontal (a) e turbina de eixo vertical (b)	7
Figura 6 - Modelos de turbinas com eixo de rotação vertical (a) Darrieus, (b) Savonius,	8
Figura 7 - Direção do vento para turbinas em upwind e downwind	9
Figura 8 - Gerador síncrono conectado à rede via conversor	12
Figura 9 - Gerador assíncrono duplamente alimentado	12
Figura 10 - Gerador assíncrono conectado à rede via conversor.....	13
Figura 11 - Gerador de indução conectado diretamente à rede	13
Figura 12 - Desenho Esquemático de um Gerador de Fluxo Axial a Ímãs permanentes	14
Figura 13 - Túnel de Vento.....	16
Figura 14 - Configuração de um sistema eólico isolado.....	16
Figura 15 - Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.....	17
Figura 16 - Parque Eólico da Prainha – CE	18
Figura 17 - Aerogerador de Eixo Vertical	19
Figura 18 - Conjunto de ampliação de rotação motor máquina lavar	20
Figura 19 - Conjunto de ampliação de rotação servomotor.....	21
Figura 20 - Conjunto de ampliação de rotação alternador automotivo	21
Figura 21 - Ventilador Axial	22
Figura 22 - Inversor de Frequência	22
Figura 23 - Projeto Túnel de Vento A) Turbina de eixo vertical; B) Ventilador; C) Túnel de Vento.....	23
Figura 24 - Banco de resistências	24
Figura 25 - Ponte de Graetz.....	24
Figura 26 - Motor de Corrente Alternada com Ímãs Permanentes	25
Figura 27 - Servomotor	26

Figura 28 - Modelo gerador CA tipo alternador automotivo.....	26
Figura 29 - Modelo de bateria	27
Figura 30 - Multímetro Digital modelo MD-6110.....	28
Figura 31 - Multímetro Digital modelo 72-6870	29
Figura 32 - Alicates Amperímetro Digital modelo ET-3990	30
Figura 33 - Alicates Wattímetro Digital modelo AW- 4700	31
Figura 34 - Termo-Anemômetro modelo TAFR-180.....	32
Figura 35 - Dinamômetro Digital Portátil modelo DD-500	33
Figura 36 - Tacômetro Digital modelo MDT-2244B	34
Figura 37 - Posicionamento dos instrumentos de medição para motor máquina de lavar	35
Figura 38 - Posicionamento dos instrumentos de medição para servomotor.....	36
Figura 39 - Posicionamento dos instrumentos de medição para alternador.....	36
Figura 40 - Sistema de geração utilizando motor máquina de lavar.....	39
Figura 41 - Sistema de geração utilizando servomotor	39
Figura 42 - Sistema de geração utilizando alternador	40
Figura 43 - Potência Elétrica Gerada	47
Figura 44 - Potência Mecânica Gerada.....	48
Figura 45 - Eficiência Eólica/Mecânica.....	49
Figura 46 - Eficiência Mecânica/Elétrica	50
Figura 47 - Eficiência Eólica/Elétrica	51
Figura 48 - Eficiências Média %.....	52
Figura 49 - Custos Energia Gerada (R\$/ kWh).....	55
Figura 50 - Geração de Energia com velocidade do vento m/s.....	55

DAL PONTE, Cristiane Rosemar, UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2018. **AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL UTILIZANDO DIFERENTES TIPOS DE GERADORES ELÉTRICOS**

Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

RESUMO

Com o aumento constante da necessidade de energia elétrica, a utilização da energia eólica surge como uma alternativa capaz de suprir essas demandas. Levando em consideração que várias regiões do País possuem um grande potencial de aproveitamento eólico, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias e investimentos para garantir o crescimento dessa fonte de energia. O objetivo deste projeto foi estudar a viabilidade técnico-econômica de um aerogerador de eixo vertical, que utilizou, para geração de energia elétrica, um motor de máquina de lavar, um servomotor e um alternador, com a finalidade de verificar qual sistema de geração apresenta melhor eficiência. Além disso, foram determinados os custos unitários da energia produzida em cada sistema de geração, e comparados com o valor da tarifa de energia elétrica cobrada pela concessionária, para consumidores rurais. A partir dos dados coletados de tensões e correntes elétricas, foram calculadas as potências e as eficiências eólico-mecânica, mecânico-elétrica e eólico-elétrica de cada sistema gerador, possibilitando uma comparação entre esses valores. O alternador apresentou a melhor eficiência eólico-mecânica (5,02%) e a melhor eficiência eólico-elétrica (0,47%). Já o motor da máquina de lavar evidenciou a melhor eficiência mecânico-elétrica (11,33%). Os resultados demonstraram que os sistemas têm pouca eficiência na geração de energia elétrica, e o custo da energia gerada aponta valores muito superiores aos praticados pela concessionária de energia elétrica local.

PALAVRAS-CHAVE: energia eólica; sistemas de geração; eficiência.

DAL PONTE, Cristiane Rosemar, UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2018. **TECHNICAL-ECONOMIC EVALUATION OF A VERTICAL AXLE WIND TURBINE USING DIFFERENT TYPES OF ELECTRIC GENERATORS**

Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

ABSTRACT

With the constant increase in the need for electric energy, the use of wind energy emerges as an alternative capable of meeting these demands. Taking into account that several regions of the country have a great potential for wind power, it is necessary to develop technologies and investments to ensure the growth of this energy source. The objective of this project was to study the technical-economical viability of a vertical axis wind turbine, which used a washing machine motor, a servomotor and an alternator for electric power generation, in order to verify which generation system presents better efficiency. In addition, the unit costs of the energy produced in each generation system were determined and compared to the value of the electricity tariff charged by the concessionaire for rural consumers. From the collected data of voltages and electric currents, the power and the wind-mechanical, mechanical-electrical and wind-electric efficiencies of each generator system were calculated, allowing a comparison between these values. The alternator presented the best wind-mechanical efficiency (5.02%) and the best wind-electric efficiency (0.47%). The motor of the washing machine showed the best mechanical-electrical efficiency (11.33%). The results showed that the systems have little efficiency in the generation of electric energy, and the cost of energy generated indicates values much higher than those practiced by the local electric power company.

KEYWORDS: wind power, generation systems, efficiency.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Fontes renováveis de energia no Brasil	3
2.1.1. Energia eólica.....	4
2.1.2. Regime dos ventos no Brasil.....	4
2.2 Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica	5
2.3 Custos Geração de Energia Eólica.....	6
2.4 Tipos de turbinas	6
2.4.1 Turbinas de eixo vertical.....	8
2.4.2 Turbinas de eixo horizontal.....	9
2.5 Determinação do potencial eólico.....	10
2.6 Motores e Geradores.....	10
2.6.1 Aerogerador com velocidade variável e gerador síncrono	11
2.6.2 Aerogerador com velocidade variável e gerador assíncrono duplamente alimentado.....	12
2.6.3 Aerogerador com velocidade variável e gerador assíncrono conectado à rede via conversor	12

2.6.4 Aerogerador de velocidade constante	13
2.6.5 Gerador síncrono com fluxo radial – imãs permanentes	14
2.7 Túnel de vento.....	14
2.8 Aplicações de Sistemas eólicos	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1. Materiais Utilizados	18
3.2. Equipamentos para Realização dos Testes	21
3.3 Equipamentos para Medições das Grandezas Elétricas e Mecânicas	28
3.4 Metodologia de Testes e Medições.....	35
3.5 Comparação de Custos.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5. CONCLUSÃO	57
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de energia elétrica e da escassez dos recursos de combustíveis fósseis, as fontes de energia renováveis representam uma alternativa para suprir estas demandas. Dentre as fontes de energia renováveis, estão a biomassa, a solar, a geotérmica, a hidrelétrica e a eólica. Como fonte de energia renovável destaca-se a energia eólica, por ser um recurso de baixo custo.

A energia eólica é uma forma de obtenção de energia de fonte renovável e limpa, que não emite gases de efeito estufa. Apresenta vantagens, como tempo reduzido de construção do parque eólico, possibilidade de uso do terreno para outros fins (agricultura e pecuária), facilidade de expansão, utilização em sistemas híbridos (solar-eólica), dentre outras.

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).

Segundo ANEEL (2016), o Brasil é privilegiado em termos de disponibilidade de recursos naturais renováveis para o aproveitamento energético, destacando-se, entre eles, os recursos hídricos, a biomassa, a fotovoltaica e a eólica, além de estar entre os países com maior percentual de energia eólica em sua matriz energética.

Levando em consideração várias regiões do país com grande potencial de aproveitamento eólico, o desenvolvimento de tecnologias e investimentos é essencial para garantir o crescimento dessa fonte de energia, e torna-se necessária a criação de meios para facilitar a implantação de sistemas eólicos de forma significativa, para atingir a máxima eficiência da utilização e transferência da energia a partir do vento.

A partir de 2009, teve início a utilização da energia eólica no mercado regulador, por meio da diversificação da matriz elétrica e de contratação prioritária de fontes renováveis. Contribuindo para a inserção dessa tecnologia no mercado brasileiro, os empreendimentos eólicos corresponderam a 50% da geração de energia elétrica contratada, com preços de venda de energia cada vez mais competitivos, preços estes muito próximos aos valores médios de termoeletricas convencionais (SIMAS; PACCA, 2013).

A utilização de aerogeradores de eixo vertical podem apresentar vantagens em determinadas situações, pois estes possuem uma velocidade de arranque mais baixa, e podem ser posicionados em alturas menores, diminuindo os custos de instalação, e facilitando a manutenção do gerador elétrico. Além disso, podem ser mais seguros quando utilizados com ventos mais fortes, não necessitando de dispositivos adicionais para acompanhar a direção do vento, diferente dos aerogeradores de eixo horizontal (SVENDSEN; MERZ, 2013).

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a viabilidade técnico-econômica da implantação de um aerogerador de eixo vertical utilizando diferentes sistemas de geração em uma agroindústria.

Para atingir o objetivo geral foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

- Acoplar uma turbina eólica de eixo vertical já construída a um motor de máquina de lavar; a um servomotor e a um alternador automotivo, para geração de energia elétrica;
- Determinar por meio de medições, qual sistema apresenta maior eficiência (eólica, mecânica e elétrica) para geração de energia;
- Determinar o custo unitário da energia produzida para cada sistema de geração, e comparar os valores obtidos com a tarifa de energia elétrica cobrada pela COPEL, para consumidores rurais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fontes renováveis de energia no Brasil

De acordo com o Relatório de Balanço Energético Nacional, as fontes renováveis representaram 81,7 % da oferta interna de eletricidade no Brasil, esta obteve um aumento em torno de 6,2% em relação ao ano de 2015, ilustrado na Figura 1.

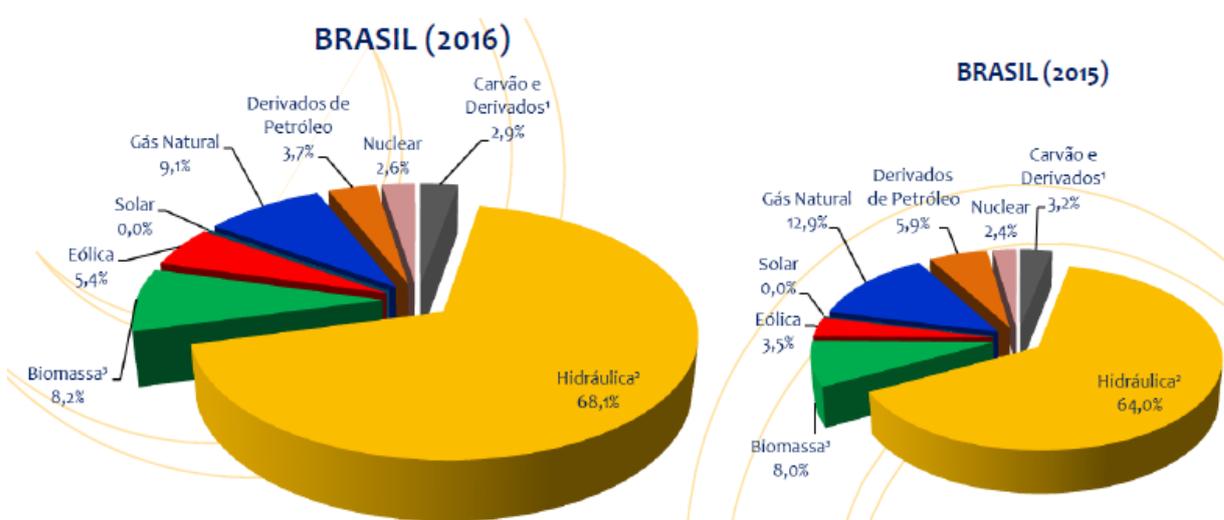


Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte
Fonte: Relatório de Balanço Energético Nacional, 2017

A Figura 1 mostra a oferta interna de eletricidade no Brasil, em 2015 e 2016. Dentre as fontes renováveis que mais contribuíram para a geração de energia elétrica, destacou-se a geração hidráulica que responde por 68,1% de toda a oferta interna. Já a fonte eólica contribuiu com 5,4% na geração de energia elétrica, esta teve um crescimento em relação ao ano de 2015 de 1,9%. Percebe-se também que houve uma redução na utilização de derivados de petróleo como fonte de geração, que representava no ano de 2015 5,9%, e apenas 3,7% no ano de 2016.

2.1.1. Energia eólica

A geração de energia eólica é obtida por meio da captação da energia cinética do vento, a qual movimentada pás de grandes turbinas que convertem esse movimento em energia elétrica.

2.1.2. Regime dos ventos no Brasil

O ordenamento geral dos ventos no Brasil é controlado pelas características da circulação geral planetária da atmosfera, conforme Figura 2. 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.

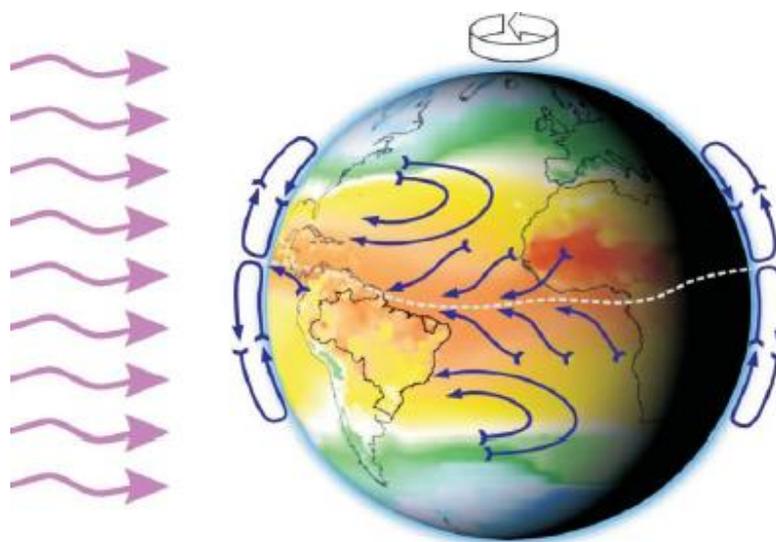


Figura 2 - Distribuição geral dos ventos
Fonte: Atlas do Potencial Brasileiro, 2001

Considerando que o eixo da Terra está inclinado de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado surgem os ventos continentais ou periódicos que compreendem as monções e as brisas.

De acordo com o mapa mostrado na Figura 3, a velocidade média dos ventos no Brasil gira em torno de 5,0 m/s, já na região oeste do Paraná essa velocidade está entre 5,0 e 7,0 m/s a 50 m de altura .

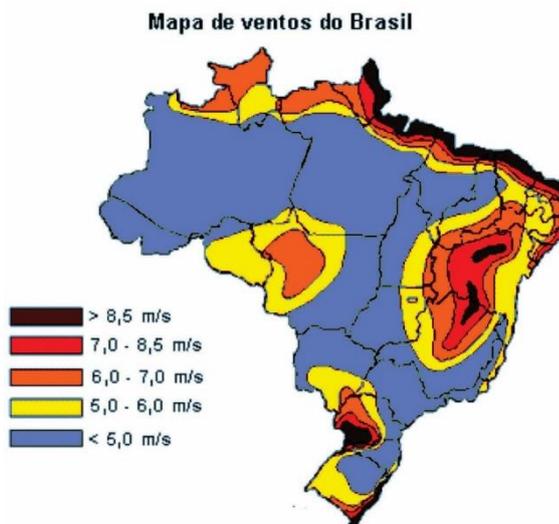


Figura 3 - Mapa de ventos do Brasil
Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica, 2001

2.2 Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica

A energia eólica é produzida a partir da força dos ventos, sendo abundante, renovável, limpa e disponível em muitos lugares. Os aerogeradores geram energia por meio da força do vento que movimenta hélices, convertendo energia cinética em energia mecânica. As pás são ligadas a um rotor, que por sua vez aciona o gerador, produzindo eletricidade. A quantidade de energia transferida varia conforme a densidade do ar, a área coberta pela rotação das hélices e a velocidade do vento (MMA, 2014). Esse tipo de energia pode ter sua eficiência reduzida pela intermitência do vento e a sua implantação exige um investimento inicial relativamente elevado (ANEEL, 2005).

Segundo a ANEEL (2005), as pequenas centrais podem suprir localidades distantes da rede, contribuindo para a universalização do atendimento. Já as grandes centrais podem atender uma significativa parcela do Sistema Interligado Nacional (SIN), reduzindo a emissão de poluentes atmosféricos, a necessidade da construção de grandes reservatórios e o risco gerado pela sazonalidade hidrológica (ANEEL, 2005).

A energia produzida pelo vento contribui com vários benefícios para a sociedade, auxiliando nos processos de produção sustentável e favorecendo o progresso energético do país. Por isso, é de extrema importância conhecer melhor e investir em projetos eólicos, para desenvolvimento de uma economia nacional forte e sustentável, colaborando assim, para a qualidade de vida das gerações futuras e para a promoção do país (GOMES; HENKES, 2015).

2.3 Custos Geração de Energia Eólica

Os custos de geração da energia eólica vêm diminuindo devido ao desenvolvimento das indústrias de equipamentos instaladas no país, pela grande quantidade de projetos contratados desde o início da década de 2000, além das políticas de incentivo, e principalmente no final da década com a entrada da energia eólica no mercado regulador de energia, o Brasil ficou entre os países com maior crescimento na implantação de novos parques eólicos (JUNIOR; RODRIGUES, 2015).

Em 2017 foram realizados dois leilões com participação da fonte eólica, A-4 e A-6, nos dias 18 e 20 de dezembro, respectivamente. No leilão A-4 o preço médio ao final das negociações foi de R\$ 144,51. Já o leilão A-6 o preço médio fechou em R\$ 189,45 por MWh. O montante eólico comercializado é entendido como essencial pela indústria para a retomada do setor, que ficou 24 meses sem contratação, desde a última em 2015 (ABEEÓLICA, 2018).

2.4 Tipos de turbinas

Os aerogeradores são equipamentos que convertem a energia do vento em energia elétrica, em duas etapas. Em um primeiro estágio, as turbinas modificam parte da energia cinética do vento em energia mecânica. Depois disso, a energia mecânica é transformada em energia elétrica no gerador, e então é transmitida para a rede elétrica. Dependendo da tecnologia utilizada pelo aerogerador, o multiplicador mecânico e o conversor eletrônico não são necessários, como ilustrado na Figura 4 (PICOLO; BÜHLER; RAMPINELLI, 2013).

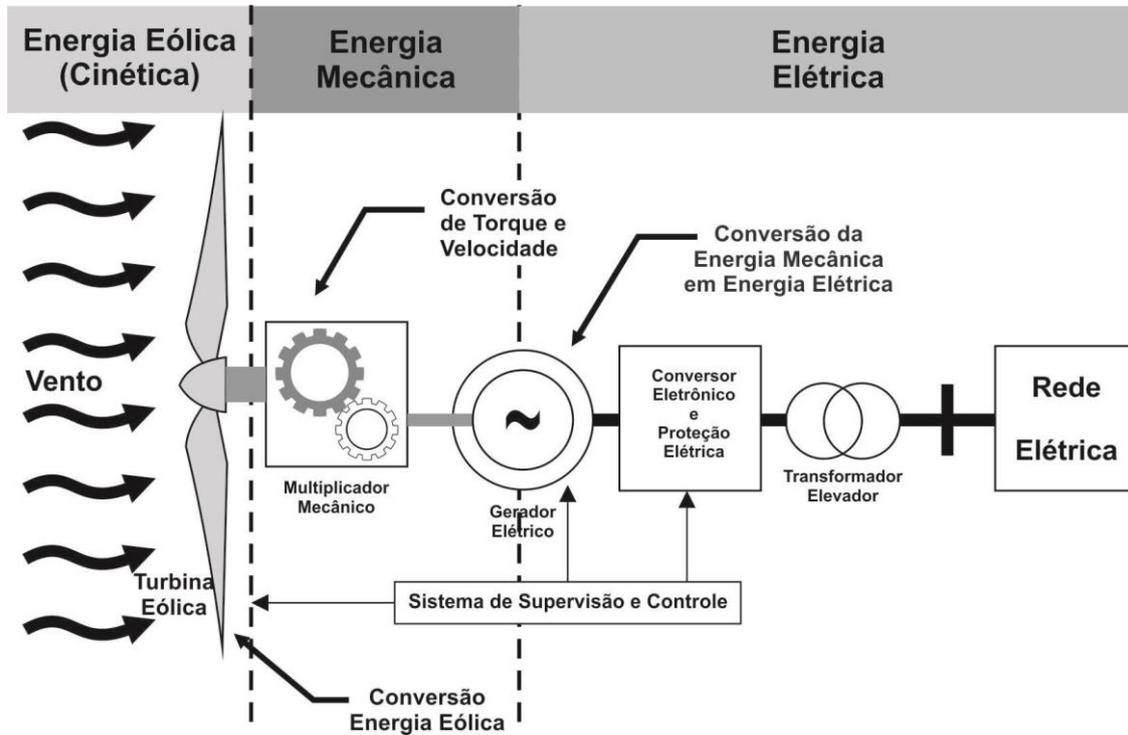


Figura 4 - Funcionamento do aerogerador
 Fonte: Picolo, Bühler e Rampinelli, 2014

Conforme a posição do eixo de rotação visto na Figura 5, as turbinas eólicas podem ser classificadas como: turbinas de eixo horizontal (horizontal axis wind turbine – HAWT) e de eixo vertical (vertical axis wind turbine – VAWT) (PINTO, 2014).

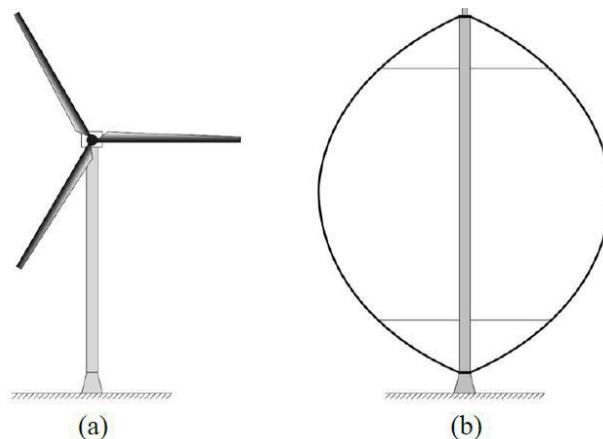


Figura 5 - Turbina de eixo horizontal (a) e turbina de eixo vertical (b)
 Fonte: Bonelli, 2010

2.4.1 Turbinas de eixo vertical

Segundo Pinto (2014), na Figura 6 é possível observar os diversos tipos de turbinas de eixo vertical.

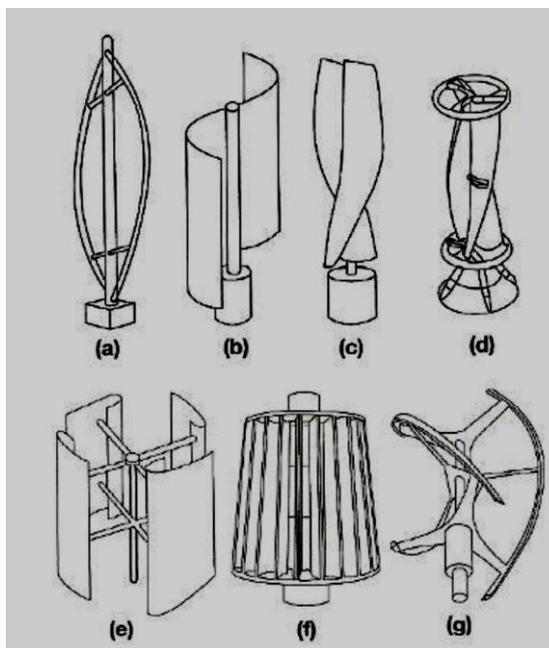


Figura 6 - Modelos de turbinas com eixo de rotação vertical (a) Darrieus, (b) Savonius, (c) Solarwind, (d) Helicoidal, (e) Nohuchi, (f) Maglev e (g) Cochrane
Fonte: Pinto, 2014.

As turbinas de eixo vertical normalmente apresentam uma menor eficiência se comparadas com as de eixo horizontal. Como vantagem, todos os equipamentos ficam ao nível do solo para facilitar a instalação e serviços, significando também, a necessidade de uma área maior para a turbina, o que se torna uma grande desvantagem em áreas de cultivo. Assim, são mais utilizadas para turbinas de pequena escala e bombeamento de água em áreas rurais (LOPEZ, 2012).

De acordo com Pinto (2014), as turbinas de eixo vertical não necessitam de nenhum tipo de controle de ajuste para mantê-las na direção do vento.

Suas principais desvantagens são 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. E o aumento da tensão sobre a turbina de eixo vertical provocada pela turbulência dos ventos mais próximos do solo (PINTO, 2014). Pode-se destacar como vantagens de uma turbina de eixo horizontal:

- Acesso a ventos com maiores velocidades levando em consideração a altura da torre;
- Melhor controle devido ao ajuste do ângulo de passo;
- Maior eficiência, tendo em vista que suas pás encaram perpendicularmente o vento.

Como desvantagens destacam-se:

- Dificuldade na instalação e manutenção de uma alta torre;
- Dificuldade no transporte dos equipamentos;
- Necessidade de um sistema de controle para girar as pás em direção ao vento;
- Construção complexa da torre capaz de suportar o peso das pás e do cubo.

2.4.2 Turbinas de eixo horizontal

Conforme mostra a Figura 7, as turbinas de eixo horizontal, baseadas na posição do rotor, em relação à torre, são classificadas em upwind e downwind; ou seja, em relação à superfície de ataque do vento incidente nas pás. Na downwind, o vento incide na parte traseira da área de varredura da turbina eólica, sua principal vantagem é deixar o vento por si só controlar o ajuste, orientando-se em relação à direção do vento. Na upwind, o vento incide na parte dianteira da área de varredura da turbina. A vantagem desse tipo de turbina é que elas evitam o distúrbio causado pela torre no vento, operando mais suavemente e fornecendo maior potência, sendo estas as turbinas eólicas utilizadas atualmente (MARQUES, 2004).

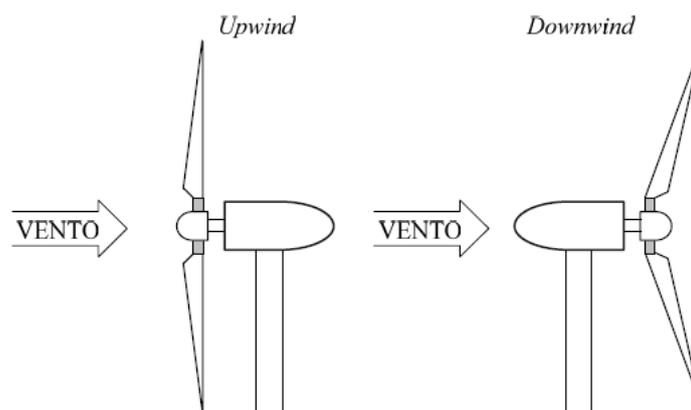


Figura 7 - Direção do vento para turbinas em upwind e downwind
Fonte: Marques, 2004

2.5 Determinação do potencial eólico

A energia eólica é convertida em energia elétrica 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 a 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:

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

Em que 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).

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 podem ser citados: o relevo, a rugosidade do solo e outros obstáculos distribuídos ao longo da região (ABEEÓLICA, 2013).

2.6 Motores e Geradores

Uma máquina é considerada um motor quando transforma energia elétrica em energia mecânica.

Conforme Lopez (2012), gerador é uma máquina responsável por transformar energia mecânica em energia elétrica. Existem geradores de corrente contínua e de corrente alternada, em que os últimos podem ser síncronos (alternadores) e assíncronos (de indução).

O princípio de funcionamento de um gerador é o seguinte: diante de uma bobina fixa (o induzido) põe-se a girar um ímã (indutor), que nos alternadores dos automóveis é geralmente acionado por uma polia. De qualquer modo, o indutor deve receber um impulso mecânico que o faça iniciar a operação. O ímã mantém um

campo do qual o fluxo combinado com a bobina varia periodicamente, com a mesma frequência de revolução do ímã. No alternador, é a variação de fluxo que induz corrente. O fluxo varia enquanto a corrente aumenta ou diminui. Quando o fluxo é máximo, ele não varia, a força eletromagnética induzida é nula, a corrente é nula e muda de sentido. O campo magnético produzido pela corrente induzida exerce no ímã forças contrárias à sua rotação (BRAGA, 2002).

2.6.1 Aerogerador com velocidade variável e gerador síncrono

Estes tipos de aerogeradores têm a possibilidade de controlar, por meio da excitação, a tensão e a potência reativa gerada, já nos geradores assíncronos não existe esta opção. Tendo em vista que sua frequência é diretamente proporcional à velocidade de rotação do rotor, torna-se imprescindível a utilização um conversor e um inversor de frequência, para fazer a conexão do gerador com a rede elétrica (LOPEZ, 2012).

Os geradores síncronos são somente utilizados em energia eólica nos sistemas de velocidade variável, sua conexão ao sistema elétrico é feita através de um conversor de frequência eletrônico, formado pelo conjunto retificador/inversor. A tensão produzida pelo gerador síncrono é retificada e a corrente contínua resultante é invertida, com o controle de frequência de saída, conforme Figura 8. A frequência produzida varia de acordo com a rotação da turbina (LOPEZ, 2012).

Conforme Lopez (2012), os geradores síncronos produzem energia de melhor qualidade e têm sido utilizados atualmente em aerogeradores de grande porte.

Nestes geradores, como ilustra a Figura 8, se aplica corrente contínua (CC) nos enrolamentos do rotor para se produzir campo magnético, pois quando iniciar a rotação, por meio da força da turbina do aerogerador, será produzido um campo magnético rotacional dentro da máquina, a qual induzirá uma força eletromotriz nos enrolamentos do estator do gerador (CHAPMAN, 2013).

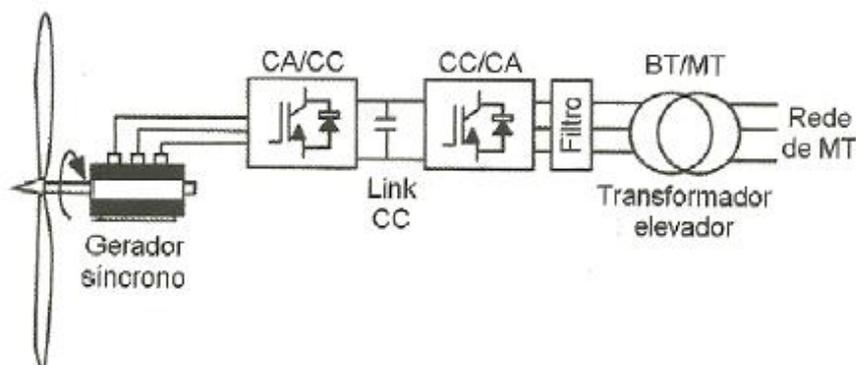


Figura 8 - Gerador síncrono conectado à rede via conversor
Fonte: Lopez, 2012

2.6.2 Aerogerador com velocidade variável e gerador assíncrono duplamente alimentado

Esse tipo de aerogerador utiliza dois enrolamentos que apresentam velocidades síncronas diferentes, com conversor de frequência entre o rotor e o estator, o que permite a aplicação de uma tensão ao enrolamento do rotor bobinado, conforme Figura 9 (LOPEZ, 2012).

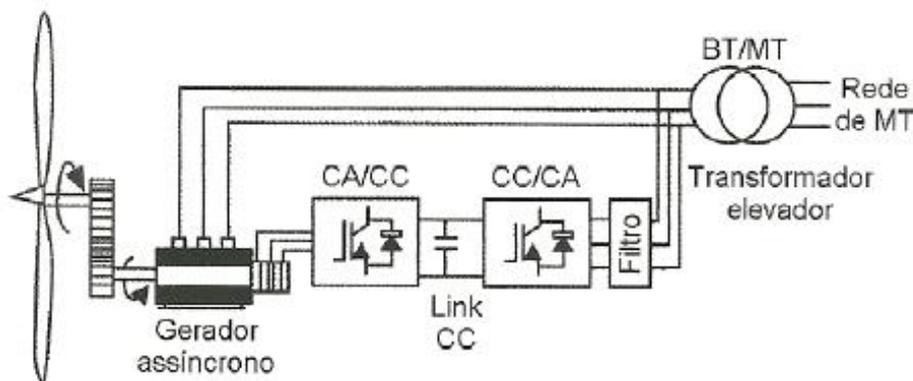


Figura 9 - Gerador assíncrono duplamente alimentado
Fonte: Lopez, 2012.

2.6.3 Aerogerador com velocidade variável e gerador assíncrono conectado à rede via conversor

Conforme Lopez (2012), esses tipos de aerogeradores necessitam de uma autoexcitação, através da utilização de capacitores para geração do campo elétrico.

Esta configuração é usada em aerogeradores com velocidade variável, e a tensão produzida pelo gerador, em uma frequência relacionada com a rotação da turbina, está isolada da tensão e frequência da rede pelo conversor, conforme (LOPEZ, 2012).

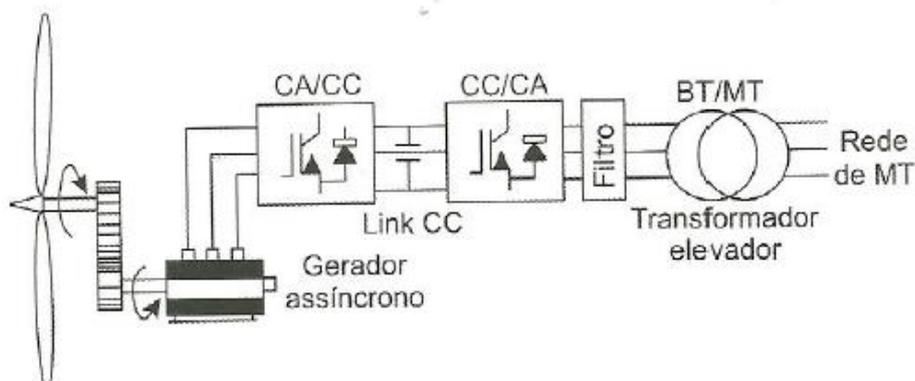


Figura 10 - Gerador assíncrono conectado à rede via conversor
Fonte: Lopez, 2012

2.6.4 Aerogerador de velocidade constante

Aerogeradores de velocidade constante usam geradores assíncronos conectados diretamente à rede elétrica. O torque da turbina varia de acordo com a mudança de velocidade do vento, resultando em maior escorregamento do gerador, fornecendo maior potência (LOPEZ, 2012).

Para melhorar a operação do rotor, utilizam-se geradores de indução, de dupla velocidade, permitindo a mudança de velocidade do rotor de duas formas: em baixas velocidades o gerador opera com rotação baixa e em altas velocidades com velocidade rotacional alta, conforme Figura 11 (LOPEZ, 2012).

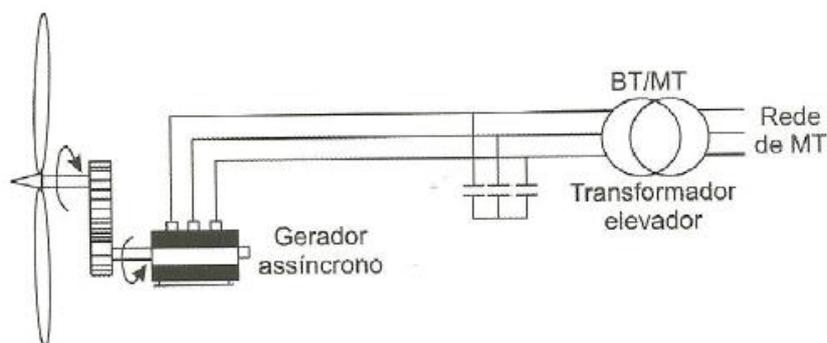


Figura 11 - Gerador de indução conectado diretamente à rede
Fonte: Lopez, 2012

2.6.5 Gerador síncrono com fluxo radial – ímãs permanentes

Conforme Grauers (1996), nos geradores com fluxo radial, o comprimento do estator e o diâmetro do entreferro podem ser escolhidos independentes. Com a utilização de entreferros pequenos é possível aumentar o valor da densidade do fluxo magnético nos mesmos, gerando assim forças magnetomotrizes elevadas no interior das estruturas do estator e do rotor.

Os geradores de ímas permanentes com fluxo radial utilizam ímãs de Neodímio pois têm elevado fluxo residual. A vantagem da excitação com ímas instalados na superfície é que a estrutura do rotor é simples e apresenta um baixo custo, e seu peso é relativamente reduzido.

Os benefícios desta máquina consistem em uma boa ventilação e resfriamento dos enrolamentos de estator, por estarem expostos ao contato com o ar, conforme Figura 12.

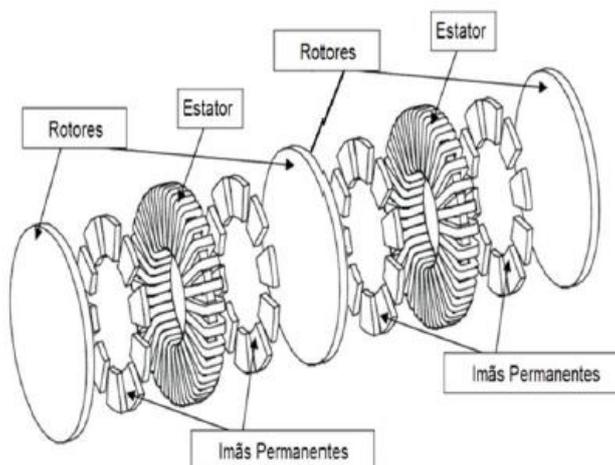


Figura 12 - Desenho Esquemático de um Gerador de Fluxo Axial a Ímãs permanentes

A maior desvantagem dos geradores de ímas permanentes com fluxo radial é a grande força axial dos ímãs no estator, que pode quebrar sua estrutura facilmente.

2.7 Túnel de vento

O túnel de vento é uma instalação destinada a produzir, de forma regular e controlada, uma corrente de ar (vento), com o objetivo de simular, no laboratório, as condições de escoamento de ar que ocorre no ambiente externo.

O primeiro túnel de vento era acionado por uma máquina a vapor, foi construído na Inglaterra em 1871, para a “Aeronautical Society of Great Britain” (GORECKI, 1988).

Os túneis evoluíram, o que contribuiu para influenciar na qualidade do escoamento e das medidas, preocupação recorrente nos estudos e desenvolvimentos de produtos e técnicas. Segundo Pope (1966) e Barlow *et al* (1999), os principais objetivos para garantir a qualidade do escoamento são: uniformidade espacial na seção de testes da velocidade, da pressão e da temperatura, ausência de rotação e de velocidades transversais, de vorticidade, uniformidade temporal, ausências de oscilações periódicas ou de pulsações e de flutuações aleatórias, da velocidade, temperatura e pressão (ondas acústicas e turbulência).

Segundo Gorecki (1988), dentre as várias características apresentadas pelos túneis de vento, enfatizam-se as que podem ser classificadas em função da posição de construção (verticais ou horizontais), do tipo da câmara (aberta ou fechada) e da velocidade do fluido.

Quanto à construção, os modelos horizontais são os mais usuais, pela praticidade e menor custo de construção.

Na grande maioria dos túneis de vento, usa-se o ar como fluido. Os gases são compressíveis e sua massa específica varia com a temperatura e a pressão, mas em muitos casos pode-se considerar sua massa específica constante, o que facilita os cálculos e fornece bons resultados (BARLOW *et al*, 1999).

Com a utilização de túneis de vento é possível determinar as características aerodinâmicas e tomar decisões que não seriam possíveis em escala real no projeto de fabricação de aeronaves, mostrado na Figura 13.



Figura 13 - Túnel de Vento
Fonte: ITA, 2017.

2.8 Aplicações de Sistemas eólicos

Sistemas Isolados

Os sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia, que pode ser feito por intermédio de baterias. Alguns desses sistemas não necessitam de armazenamento, como, os sistemas para irrigação, em que toda a água bombeada é diretamente consumida.

Os sistemas que armazenam energia em baterias necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria. O controlador de carga tem como principal objetivo evitar danos à bateria por sobrecarga ou descarga profunda.

Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessária a utilização de um inversor. A configuração completa de um sistema eólico isolado é apresentada na Figura 14.

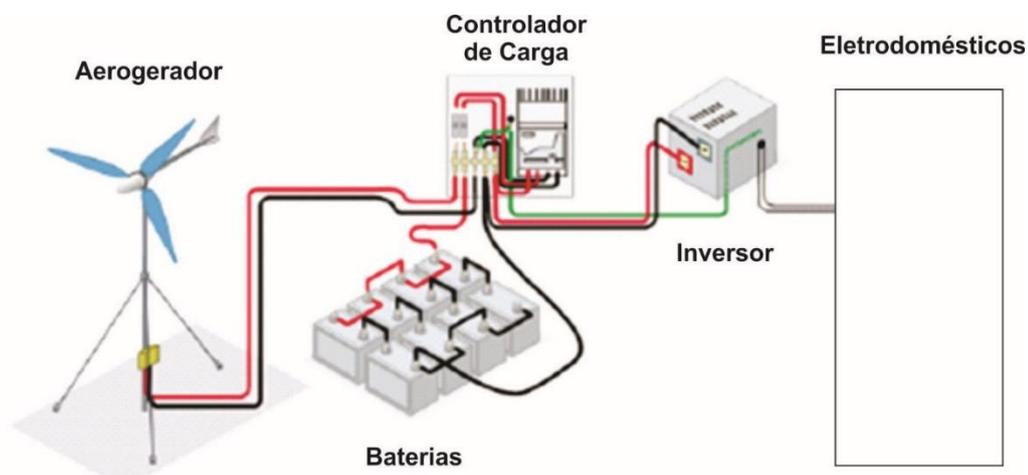


Figura 14 - Configuração de um sistema eólico isolado
Fonte: Tutorial Eólica, 2008.

Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são aqueles que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia, como por exemplo, turbinas eólicas, módulos fotovoltaicos, entre outras.

Em geral eles são empregados em sistemas de médio a grande porte, destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, esse sistema também necessita de um inversor.

Na Figura 15 visualiza-se a configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.



Figura 15 - Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel
Fonte: Tutorial Eólica, 2008.

Sistemas Interligados à Rede

Os sistemas interligados à rede não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica, conforme Figura 16.



Figura 16 - Parque Eólico da Prainha – CE
Fonte: Tutorial Eólica, 2008

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no laboratório de Metalmeccânica do SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, unidade de Cascavel – PR, com localização geográfica definida pelas coordenadas $24^{\circ} 58'$ Latitude Sul (S) e $53^{\circ} 26'$ Longitude Oeste (W) e altitude média de 781 metros acima do nível do mar.

3.1. Materiais Utilizados

Turbina eólica

Para fins de análise e comparações da eficiência de geração de energia elétrica, dos diferentes sistemas de geração desconectados da rede de energia da concessionária, foi utilizada uma turbina eólica de eixo vertical, desenvolvida por Dal Ponte (2017), que possui uma massa aproximada de 20,70 Kg, conforme a Figura 17.



Figura 17 - Aerogerador de Eixo Vertical
Fonte: Dal Ponte, 2017.

Segundo Dal Ponte (2017), a turbina de eixo vertical desenvolvida foi baseada no modelo H-Darrieus composta por pás, estrutura, mancais e eixo principal com as seguintes dimensões externas: 2000mm de diâmetro por 1000mm de altura.

A pá tem perfil em 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. Essa estrutura é envolvida por uma chapa de aço SAE 1010 com 0.8 mm de espessura, fixada por meio de parafusos M4.

A estrutura de ligação ao conjunto de rotores é composta por tubos de aço inox AISI 304 com 21 mm de diâmetro e 900mm de comprimento, fixados com parafusos e porcas M4.

O eixo central da turbina é constituído por um tubo de aço carbono SAE 1020, de perfil redondo com dimensões de 1300 mm de comprimento, 50,8 mm de diâmetro, com parede de 5 mm.

Acoplamento da turbina eólica ao gerador

O conjunto de ampliação de rotação para o motor da máquina de lavar é formado por duas polias de 230mm de diâmetro e 2 polias de 70mm de diâmetro, ligadas por correias A-35 e A-57. Esse conjunto possui uma relação de transformação que totaliza uma ampliação de 10,8 vezes. Conforme Figura 18, o conjunto é feito de um suporte com quatro tubos fixados na base do aerogerador por meio de quatro parafusos M10.

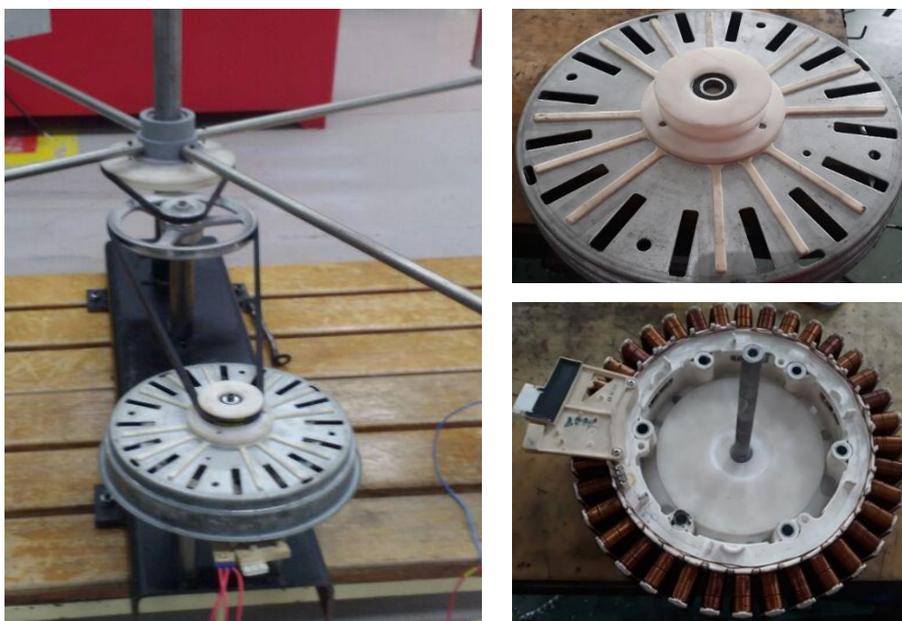


Figura 18 - Conjunto de ampliação de rotação motor máquina lavar

O conjunto de ampliação de rotação para o servomotor utilizou as correias A-35 e A-70 e uma polia de 70mm em alumínio acoplado ao eixo do servomotor, mantendo a relação de transformação em 10,8 vezes. Conforme Figura 19, o conjunto é alinhado e fixado na base por meio de um suporte de chapa 3/16". A fixação é feita tanto na base do aerogerador quanto no servomotor por quatro parafusos M10 com porcas autotravantes.



Figura 19 - Conjunto de ampliação de rotação servomotor

Para a instalação do alternador automotivo a correia A-70 por foi substituída por uma A-52. Manteve-se a relação de transformação em 10,8 vezes. Exemplificada na Figura 20, em que 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 20 - Conjunto de ampliação de rotação alternador automotivo

3.2. Equipamentos para Realização dos Testes

Ventilador Axial

Para simular a velocidade do vento, foi usado 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, demonstrado na Figura 21.



Figura 21 - Ventilador Axial
Fonte: Dal Ponte, 2017

Inversor de frequência

Para controlar a variação da velocidade do exaustor foi utilizado um inversor de frequência da WEG, ilustrado na Figura 22 com especificações técnicas descritas na Tabela 1.



Figura 22 - Inversor de Frequência
Fonte: Catálogo WEG, 2017

Tabela1 - Especificações técnicas do Inversor de Frequência

ESPECIFICAÇÕES – MODELO CFW 08	
Fabricante	Weg
Tensão	200-220 V trifásico

Corrente	1,0 a 28A
----------	-----------

Túnel de Vento

Para confecção do túnel de vento foram utilizadas chapas de compensado 2500x3000mm com espessura de 6mm, conforme Figura 23.

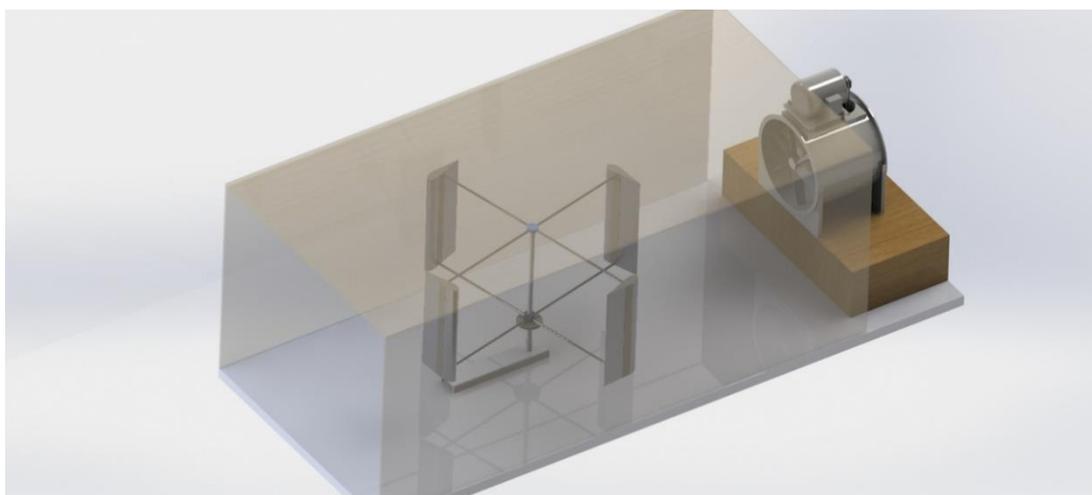
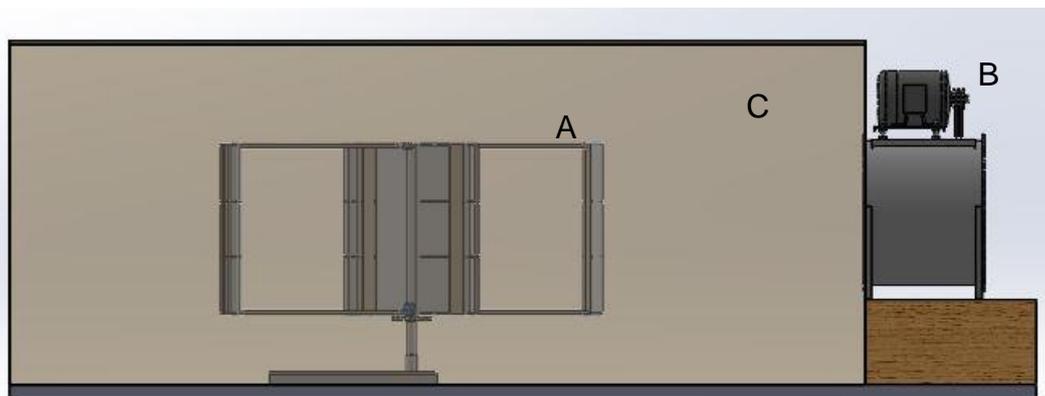


Figura 23 - Projeto Túnel de Vento A) Turbina de eixo vertical; B) Ventilador; C) Túnel de Vento

O objetivo do túnel de vento foi evitar possíveis perdas e desvios da massa de ar pelas laterais da turbina.

Banco de resistências

O banco de resistências utilizadas como carga é composto por 5 unidades de resistências de 5W e 10 k Ω cada, totalizando 25W de carga máxima teórica,

conectadas em paralelo por um fio condutor de $\#2,5\text{mm}^2$. Para os testes foram adicionadas chaves liga/desliga em cada resistência, com a finalidade de variar a carga, que foi fracionada na seguinte sequência: $10\text{ k}\Omega$, $5\text{ k}\Omega$, $3,33\text{ k}\Omega$, $2,5\text{ k}\Omega$, $2\text{ k}\Omega$, exemplificada na Figura 24.

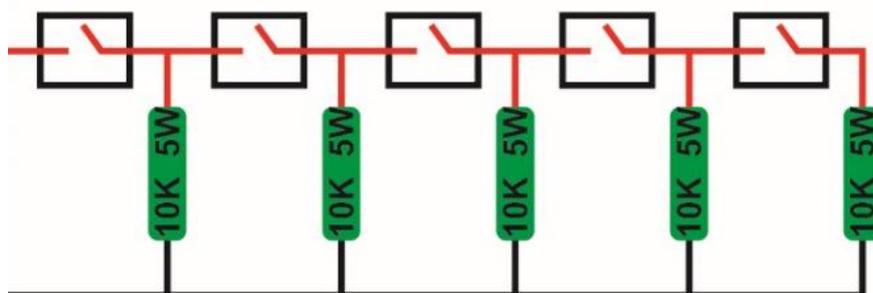


Figura 24 - Banco de resistências

Retificador Trifásico de Onda Completa – Ponte de Graetz ou Ponte Retificadora

A ponte de GRAETZ pode ser considerada como uma associação em série de dois retificadores trifásicos de ponto médio, com o intuito de transformar a tensão trifásica e a corrente alternada em tensão monofásica e corrente contínua, representada na Figura 25.

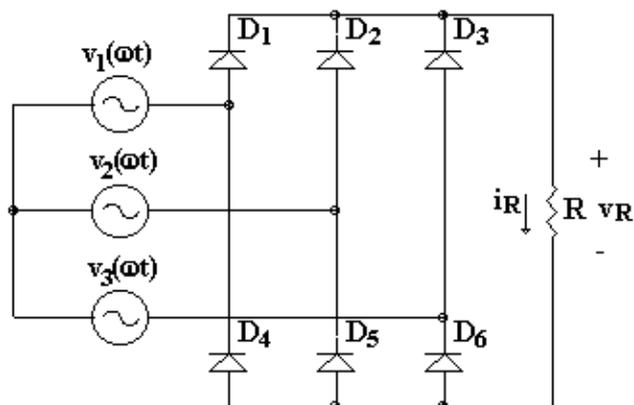


Figura 25 - Ponte de Graetz

Motor de Corrente Alternada com Imãs Permanentes

Para geração de energia foi conectado à turbina um motor (funcionando como gerador) de corrente alternada com imãs permanentes e retificador, conforme

Figura 26. Esse motor é usado em lavadora-secadora de roupas modelo LSE09, do fabricante Electrolux. As especificações técnicas do motor são mostradas na Tabela 2.



Figura 26 - Motor de Corrente Alternada com Imãs Permanentes

Tabela2 - Especificações técnicas do Motor com Imãs Permanentes

ESPECIFICAÇÕES – MODELO DON1300WN/ST - Trifásico	
Fabricante	Electrolux
Tensão máxima	127 V
Potência máxima	1350 W
Rotação máxima	1400 rpm

Servomotor de Corrente Alternada

Para geração de energia a turbina foi ligada a um servomotor (funcionando como gerador) de corrente alternada, conforme Figura 27. O servomotor é utilizado em uma porcionadora, na linha de produção de um frigorífico. As especificações do servomotor são mostrados na Tabela3.

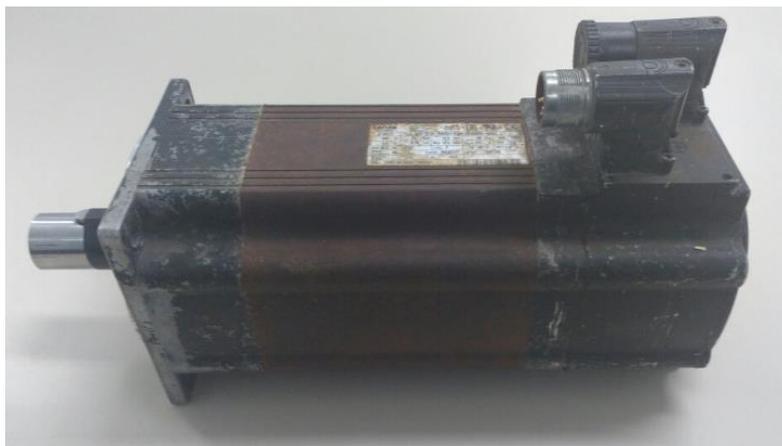


Figura 27 - Servomotor

Tabela 3 - Especificações técnicas do Servomotor

ESPECIFICAÇÕES – MODELO MCS12L20 - Trifásico	
Fabricante	Lenze
Tensão máxima	330 V
Corrente máxima	28A
Potência máxima	2.8 kW
Rotação máxima	1950 rpm

Alternador automotivo

A unidade geradora utilizou um alternador automotivo da marca Bosch, com controlador e retificador de carga, para conversão de corrente alternada em corrente contínua conforme Figura 28. As especificações do alternador são indicadas na Tabela 4.



Figura 28 - Modelo gerador CA tipo alternador automotivo
Fonte: Dal Ponte, 2017

Tabela 4 - Especificações técnicas do Alternador Automotivo

ESPECIFICAÇÕES	
Fabricante	Bosch
Corrente	45A
Potência	540 W
Tensão	12V

Para fazer a excitação do fluxo magnético do alternador utilizou-se uma bateria automotiva nova de chumbo ácido, com capacidade de 60Ah, modelo F60DG, da Conectiva Figura 29. A bateria automotiva foi escolhida para o experimento por seu custo ser menor.



Figura 29 - Modelo de bateria
Fonte: catálogo baterias Conectiva, 2018

3.3 Equipamentos para Medições das Grandezas Elétricas e Mecânicas

Multímetros

Para realizar as medições de tensão e corrente elétricas alternada, foi utilizado um Multímetro Digital modelo MD-6110 Figura 30, caracterizado na Tabela 7.



Figura 30 - Multímetro Digital modelo MD-6110

Tabela 7 - 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

Para realizar as medições de corrente alternada, foi utilizado um Multímetro Digital modelo 72-6870 Figura 31, especificado na Tabela 8.



Figura 31 - Multímetro Digital modelo 72-6870

Tabela 8 - Especificações técnicas do Multímetro Digital modelo 72-6870

72-6870 ESPECIFICAÇÕES	
Fabricante	Tenma
Precisão	+/- 1%
Resistência	400ohm - 40Mohm
Tensão DC/AC	400mV - 1000V / 400mV – 700V
Corrente DC/AC	40 mA - 20A
Temperatura	-48°C – 749°C

Alicate Amperímetro Digital

Para realizar as medições de corrente alternada foi utilizado um Alicate Amperímetro Digital modelo ET- 3990 Figura 32, descrito na Tabela 9.



Figura 32 - Alicate Amperímetro Digital modelo ET-3990

Tabela 9 - 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

Alicate Wattímetro

Para realizar as medições de tensão alternada trifásica das fases do gerador antes da retificação, foi utilizado um Alicate Wattímetro Digital modelo AW- 4700 Figura 33, caracterizado na Tabela 10.



Figura 33 - Alicate Wattímetro Digital modelo AW- 4700

Tabela 10 - Especificações técnicas do Alicate Wattímetro Digital modelo AW- 4700

AW - 4700	
ESPECIFICAÇÕES	
Fabricante	Minipa Eletrônica
Precisão	+/- 1,2%
Resistência	600Ω
Tensão DC/AC	1000V
Corrente DC/AC	2500A
Temperatura	0°C – 50°C

Termo-Anemômetro

Para realizar as medições da velocidade do vento, foi utilizado um Termo-Anemômetro modelo TAFR-180 Figura 34, detalhado na Tabela 11.



Figura 34 - Termo-Anemômetro modelo TAFR-180

Tabela 11 - Especificações técnicas do Termo-Anemômetro modelo TAFR-180

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

Dinamômetro

Para determinação do Torque (Nm) desenvolvido pelo aerogerador foi medida a força (N) exercida na pá, no sentido da rotação, com auxílio de um dinamômetro digital portátil Figura 35, conforme descrição da Tabela 12.

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



Figura 35 - Dinamômetro Digital Portátil modelo DD-500

Tabela 12 - 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)

Tacômetro

As medições das rotações dos motores e do alternador, em rpm, foram feitas com um tacômetro digital modelo MDT-2244B Figura 36, caracterizado conforme a Tabela 13.



Figura 36 - Tacômetro Digital modelo MDT-2244B

Tabela 13 - Especificações técnicas do tacômetro modelo MDT – 2244B

MDT – 2244B	
ESPECIFICAÇÕES	
Fabricante	Minipa
Faixa de medição	2,5 a 99999 RPM
Resolução	0,1 RPM (2,5 a 999,9 RPM)
Precisão	± (0,5% + 1 dígito)
Distância de detecção	50 a 250mm

3.4 Metodologia de Testes e Medições

Os testes foram realizados para cada um dos geradores em estudo (motor máquina de lavar, servomotor e alternador automotivo), utilizando um ventilador controlado por um inversor de frequência, com a intenção de ampliar a velocidade do vento, para colocar a turbina em movimento. Para evitar a dispersão do vento, e tentar aproximar os testes de situações reais de campo, foi construído um túnel de vento, e a turbina eólica foi posicionada em seu interior.

Para cada gerador foram coletados: a velocidade do vento utilizando o termo-anemômetro; a rotação do eixo do gerador com uso de um tacômetro digital; a força exercida pelas pás da turbina com o auxílio de um dinamômetro digital; a tensão e corrente alternada, com auxílio de multímetros e alicates amperímetros, ilustrados nas Figuras 37, 38 e 39.

As informações foram medidas da seguinte forma: primeiro foram coletados os dados acima descritos para sistema em vazio (sem carga). Para cada etapa o tempo estipulado foi de 3 minutos. Na sequência foi ligada uma chave que acionou uma carga de $10\text{ k}\Omega$. O mesmo procedimento foi feito para as cargas de $5\text{ k}\Omega$, $3,33\text{ k}\Omega$, $2,5\text{ k}\Omega$ e $2\text{ k}\Omega$ somando-se um tempo de 18 minutos. Este procedimento foi adotado para verificar o comportamento da geração de energia elétrica em diferentes variações de cargas.

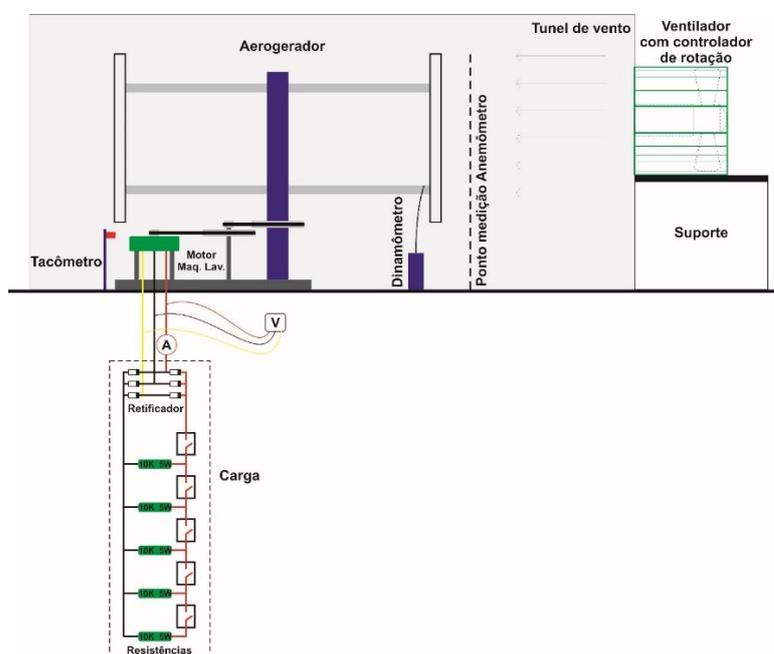


Figura 37 - Posicionamento dos instrumentos de medição para motor máquina de lavar

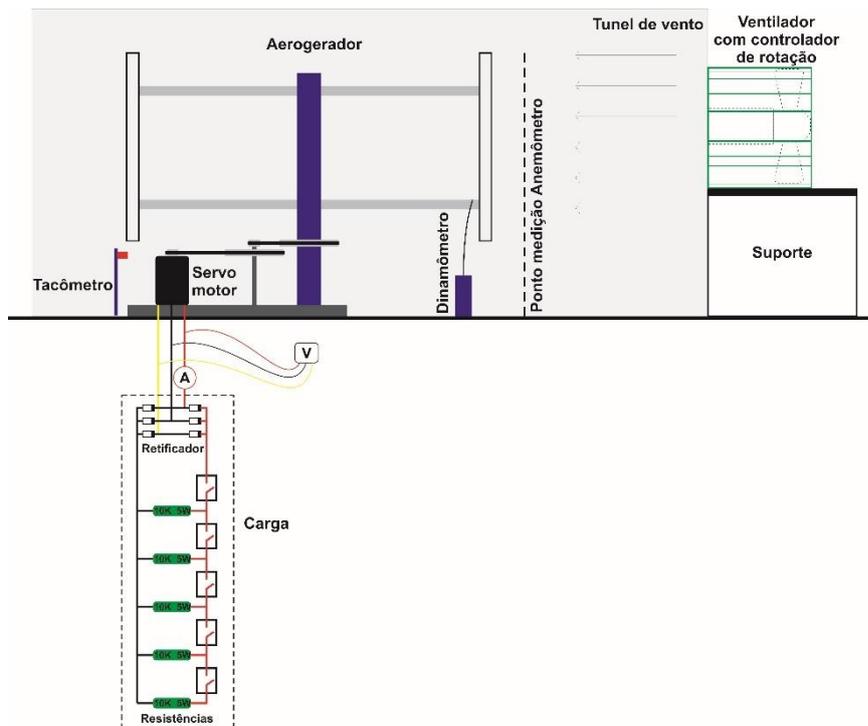


Figura 38 - Posicionamento dos instrumentos de medição para servomotor

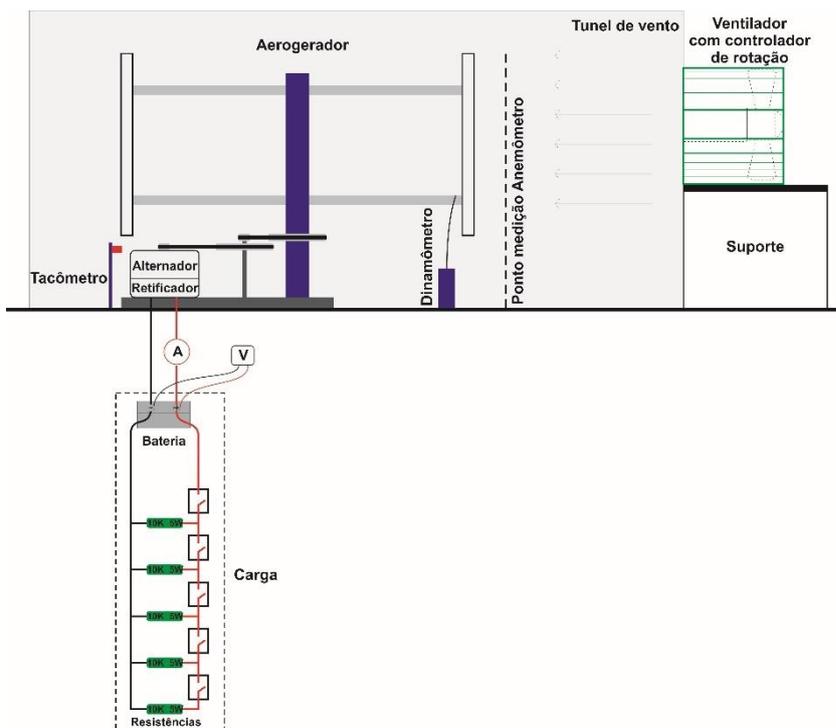


Figura 39 - Posicionamento dos instrumentos de medição para alternador

A partir dos dados das planilhas foram calculadas as potências eólicas, potências mecânicas, potências elétricas e as eficiências de cada sistema, baseadas nas equações apresentadas a seguir:

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

$$\text{Potência Mecânica (W): } \frac{\text{conjugado (Nm)} \times \text{rpm eixo}}{9,555} \quad (2)$$

$$\text{Potência Elétrica de Geração (W): } \text{tensão (V)} \times \text{corrente (A)} \quad (3)$$

$$\text{Eficiência Eólica-Mecânica (\%): } \frac{\text{Potência Mecânica (W)}}{\text{Potência Eólica (W)}} 100\% \quad (4)$$

$$\text{Eficiência Mecânica-Elétrica (\%): } \frac{\text{Potência Elétrica de Geração (W)}}{\text{Potência Mecânica (W)}} 100\% \quad (5)$$

$$\text{Eficiência Eólica-Elétrica (\%): } \frac{\text{Potência Elétrica de Geração (W)}}{\text{Potência Eólica (W)}} 100\% \quad (6)$$

$$\text{Energia (Wh): } \frac{\text{Potência (W)} \times \text{Intervalo tempo medição (min)}}{60} \quad (7)$$

3.5 Comparação de Custos

Para fins de comparação de custos, foi considerada uma velocidade do vento constante ao longo do ano, semelhante aos valores estipulados neste experimento, e um fator de disponibilidade da geração eólica de 90%. Sendo assim, o número de horas anuais em que a energia elétrica foi efetivamente gerada é igual a 7884 horas (90% de 8760 horas/ano).

Para calcular a geração anual de energia, em cada sistema foi utilizado a potência média multiplicada pelo número de horas disponíveis.

O cálculo dos custos anualizados dos equipamentos, foi baseado na equação (8).

$$U = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (8)$$

Sendo: U o custo anualizado do equipamento (\$)

P o investimento inicial do equipamento (\$)

i a taxa de juros anual, decimal

n a vida útil do equipamento, anos

O custo unitário da energia gerada, foi calculado a partir da equação (9).

$$\text{Custo unitário } \left(\frac{\$}{Kwh} \right) = \frac{\text{Custo Anualizado dos Equip. } (\$/Ano)}{\text{Energia Gerada por Ano } (KwhAno)} \quad (9)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto aerogerador utilizando diferentes motores é apresentado nas Figuras 40, 41 e 42.



Figura 40 - Sistema de geração utilizando motor máquina de lavar

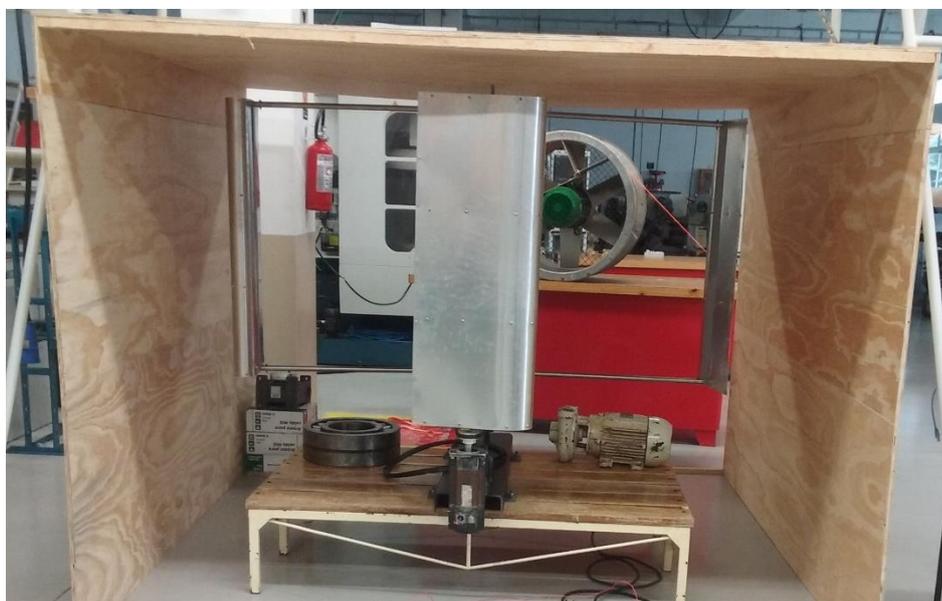


Figura 41 - Sistema de geração utilizando servomotor

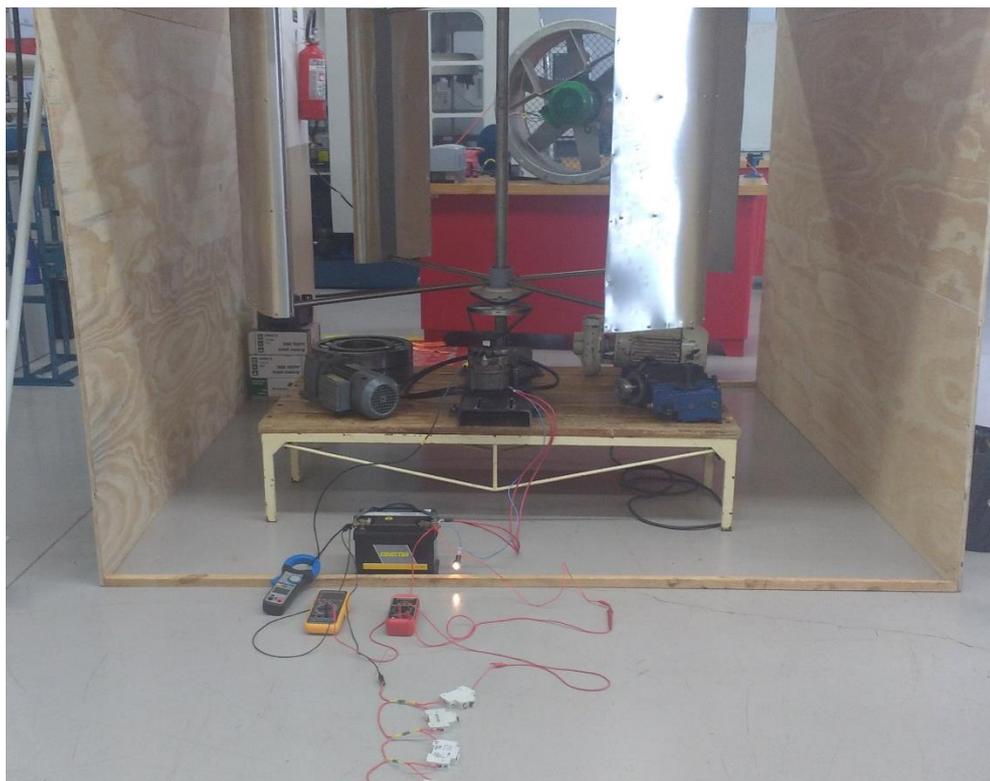


Figura 42 - Sistema de geração utilizando alternador

Na Tabela14, Dal Ponte (2017) apresenta o custo total de fabricação da turbina de eixo vertical.

Tabela 14 - Custos para construção da turbina

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	60,00

		1000m	
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
	Montagem do conjunto		200,00
	Total conjunto turbina		1404,57

Fonte: Dal Ponte, 2017

A turbina de eixo vertical teve um custo total de fabricação de R\$ 1404,57.

Na Tabela15 estão os dados relacionados aos custos de aquisição/instalação do conjunto motor de máquina de lavar, que totalizou R\$ 858,50.

Tabela 15 - Custos de aquisição/instalação conjunto motor máquina de lavar

Qtde	Descrição	Material	Valor (R\$)
1	Motor Máquina de Lavar	Electrolux	450,00
4	Suporte motor	Tubo Aço Inox com embuchamento diâmetro 38mm x 140mm	50,00
4	Parafusos M10 para fixação do motor	M10 x 160mm	16,00
1	Polia	Diâmetro 70mm em poliacetal	20,50
1	Base motor	Poliacetal usinado e fresado	90,00
1	Rolamento para polia conjunto de ampliação	Rolamento	12,00
5	Banco de Resistências	Resistência de fio 10 ohms 5W	20,00
1	Diversos	Fios Cabos e terminais e tinta	30,00
	Montagem do conjunto motor		170,00

Total

858,50

Na Tabela16, são descritos os custos de aquisição/instalação do conjunto servomotor, que totalizou R\$ 1058,00.

Tabela16 - Custos de aquisição/instalação do servomotor

Qtde	Descrição	Material	Valor (R\$)
1	Servomotor usado	Lenze 330V 28A	820,00
1	Suporte servomotor	Chapa 3/16"	90,00
4	Parafuso M10 para fixação	M10 x 60mm	5,20
4	Porca autotravante	M10	2,80
5	Banco de Resistências	Resistência de fio 10 ohms 5W	20,00
1	Diversos	Fios Cabos e terminais e tinta	30,00
	Montagem do conjunto servomotor		90,00
	Total		1058,00

Os custos de aquisição/instalação do conjunto alternador, são representados na (Tabela17), foi de R\$ 371,50.

Tabela 17 - Custos de aquisição/instalação do alternador

Qtde	Descrição	Material	Valor (R\$)
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
5	Banco de Resistências	Resistência de fio 10 ohms 5W	20,00
1	Diversos	Fios Cabos e terminais e tinta	50,00
	Montagem do conjunto alternador		70,00
	Total		371,50

Resultados dos testes realizados com os diferentes sistemas de geração

Todos os testes propostos na metodologia foram realizados no sistema de geração eólica, e os resultados são descritos nas tabelas 18, 19 e 20.

Na Tabela 18 são apresentados os dados adquiridos da média dos testes com o motor da máquina de lavar.

Tabela 18 - Dados adquiridos da média dos testes motor máquina de lavar

Carga	Vca (V)	Ica (A)	Rotação gerador (rpm)	Rotação turbina (rpm)	Potência alternada (W)
Circuito Aberto	44,00	0	164	15	0
10 K□	34,00	0,049	139	12	2,89
5 K□	33,10	0,048	126	11	2,75
3,33 K□	25,40	0,034	89	8	1,50
2,5 K□	20,40	0,029	85	7	1,02
2 K□	22,90	0,029	80	7	1,15

De acordo com os dados acima na Tabela 18, a primeira coluna é direcionada às variações de carga adicionada, em que as medições foram iniciadas sem carga.

Na segunda coluna estão relacionados os dados referentes às médias das tensões alternadas entre o motor da máquina de lavar e a ponte retificadora, que foram adquiridas com a utilização do Alicete Wattímetro Digital modelo AW- 4700.

Na terceira coluna descrevem-se os dados referentes às médias das correntes alternadas entre o motor da máquina de lavar e a ponte retificadora, obtidas a partir do Multímetro Digital modelo 72-6870.

A quarta coluna refere-se aos dados das rotações médias do motor adquiridas com a utilização do Tacômetro modelo MDT – 2244B.

Na quinta coluna exemplificam-se os dados sobre as rotações médias do eixo principal da turbina, a qual foi calculada com base nas rotações do eixo motor e no fator de multiplicação do conjunto de ampliação constituído por polias.

Por fim, na sexta coluna expõe-se os dados de potência alternada, obtida pela multiplicação entre a tensão e a corrente alternada expressa W.

Esses dados indicam que à medida que a carga aumenta (ou seja, diminui a resistência), os valores de potência também diminuiriam. Este fato ocorre devido às características técnicas do gerador e da carga, considerando que o motor da máquina de lavar apresenta um potencial de geração limitado em relação à demanda de carga exigida.

Na Tabela19 os dados expostos foram adquiridos a partir da média dos testes do servomotor. O procedimento utilizado na realização dos testes foi o mesmo proposto na sequência descrita anteriormente.

Tabela 19 - Dados adquiridos da média dos testes servomotor

Carga	Vca (V)	Ica (A)	Rotação gerador (rpm)	Rotação turbina (rpm)	Potência alternada (W)
Circuito Aberto	152,30	0	641	59	0
10 K Ω	114,70	0,00012	537	49	0,02
5 K Ω	161,20	0,00568	174	16	1,59
3,33 K Ω	142,50	0,01465	165	15	3,62
2,5 K Ω	158,50	0,03029	156	14	8,32
2 K Ω	160,00	0,03016	151	13	8,36

Em conformidade com os dados da Tabela 19, à medida que carga aumenta (ou seja, diminui a resistência), os valores de potência também aumentaram. Este fato ocorre devido às características técnicas do gerador e da carga, considerando que o servomotor tem um potencial de geração maior que o exigido pela carga, indicando que mais carga poderia ser adicionada, e conseqüentemente, uma maior geração poderia ser obtida.

A Tabela20 apresenta os dados decorrentes da média dos testes do alternador.

Tabela 20 - Dados adquiridos da média dos testes alternador

Carga	Icc (A)	Vcc (V)	Rotação gerador (rpm)	Rotação turbina (rpm)	Potência Gerador/Bateria (W)
Circuito Aberto	0	12,58	981	90	0
10 K Ω	1,20	12,68	938	86	15,22
5 K Ω	1,10	12,67	940	87	13,94
3,33 K Ω	0,70	12,72	947	87	8,90
2,5 K Ω	0,90	12,75	945	87	11,48
2 K Ω	0,88	12,88	949	87	11,33

De acordo com a Tabela 20, na primeira coluna mostram-se as variações de carga adicionada, as medições foram iniciadas sem carga.

A segunda coluna apresenta os dados referente às médias das correntes contínua, adquiridas com a utilização do Multímetro Digital modelo 72-6870.

A terceira coluna apresenta os dados sobre as médias das tensões contínua, obtidas com a utilização do Multímetro Digital modelo MD-6110.

Na quarta coluna são descritos os dados referentes às rotações médias do alternador adquiridas com a utilização do Tacômetro modelo MDT – 2244B.

As rotações médias do eixo principal da turbina, estão representadas na quarta coluna, e foram calculadas com base nas rotações do alternador e no fator de multiplicação do conjunto de ampliação constituído por polias.

Na sexta coluna são exemplificados os dados referentes à potência contínua, obtida por meio da multiplicação entre a corrente I_{cc} e a tensão (alternador/bateria), expressa em W .

Conforme apresentado na Tabela 20, à medida que a carga aumenta (ou seja, diminui a resistência), os valores de potência também diminuiram. No entanto, comparando o comportamento do alternador com o motor máquina de lavar, nota-se que ambos apresentaram limitações em relação à carga. Verificou-se que o alternador apresentou maior potencial de geração.

Cálculo das Potências

O cálculo da potência eólica foi feito com uma velocidade média do vento de 12,84 m/s) a área de 2 m² na turbina e 1,225 Kg/m³ para a densidade do ar, conforme equação (1).

A potência mecânica foi calculada de acordo com os dados coletados do valor do conjugado (Nm) e a rotação da turbina para cada sistema de geração, conforme equação (2).

O cálculo da potência elétrica foi baseado nos dados coletados da tensão e a corrente alternada dos diferentes sistemas de geração, conforme equação (3).

Na Tabela 21 estão os dados sobre a potência elétrica gerada em cada sistema, levando em consideração a variação das cargas resistivas montadas em paralelo.

Tabela 21 – Potência Elétrica Gerada

Carga	Potência (W) Motor Máquina de Lavar	Potência (W) Servomotor	Potência(W) Bateria/Carga Alternador
Circuito Aberto	0	0	0
10 K Ω	2,89	0,02	15,22
5 K Ω	2,75	1,59	13,94
3,33 K Ω	1,50	3,62	8,90
2,5 K Ω	1,02	8,32	11,48
2 K Ω	1,15	8,36	11,33

A Figura 43 apresenta a comparação entre a média das variações das cargas resistivas e a potência média em (W) gerada pelos diferentes sistemas. Verifica-se que as maiores potências geradas foram feitas com o alternador, utilizando uma carga resistiva de 10 k Ω gerou 15,22 W. A menor potência gerada pelo alternador foi de 8,90 W para uma carga de 3,33 k Ω .

O servomotor apresentou potências de 1,59 W e 8,36 W para as cargas de 5 k Ω e 2 k Ω .

O motor máquina de lavar foi o sistema que denotou as menores potências entre os sistemas analisados, para uma carga de 10 k Ω gerou 2,89 W e 1,02 W para uma carga de 2,5 k Ω .

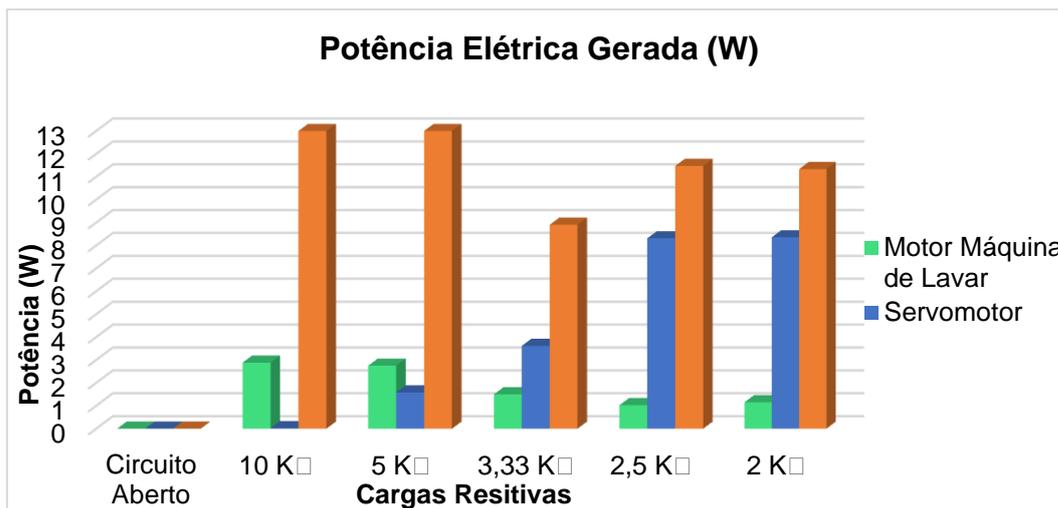


Figura 43 - Potência Elétrica Gerada

Na Tabela 22 estão os dados sobre a potência mecânica disponível, gerada em cada sistema.

Tabela 22 – Potência Mecânica Disponível

Carga	Motor Máquina de Lavar			Servomotor			Alternador		
	Rotação Turbina (rpm)	Conjugado (Nm)	Potência Mecânica (W)	Rotação Turbina (rpm)	Conjugado (Nm)	Potência Mecânica (W)	Rotação Turbina (rpm)	Conjugado (Nm)	Potência Mecânica (W)
Circuito Aberto	15	10,47	16,44	59	18,09	111,70	90	13,81	130,08

Na Figura 44 é possível verificar o sistema que apresentou a maior potência mecânica disponível, o alternador 130,08 W.

O sistema utilizando o servomotor indicou uma potência de 111,70 W. E o motor máquina de lavar apresentou uma menor potência de 16,44 W.

A potência mecânica disponível foi calculada em função da rotação e conjugado obtidos com o sistema de geração trabalhando em circuito aberto, ou seja, sem o acoplamento das cargas.

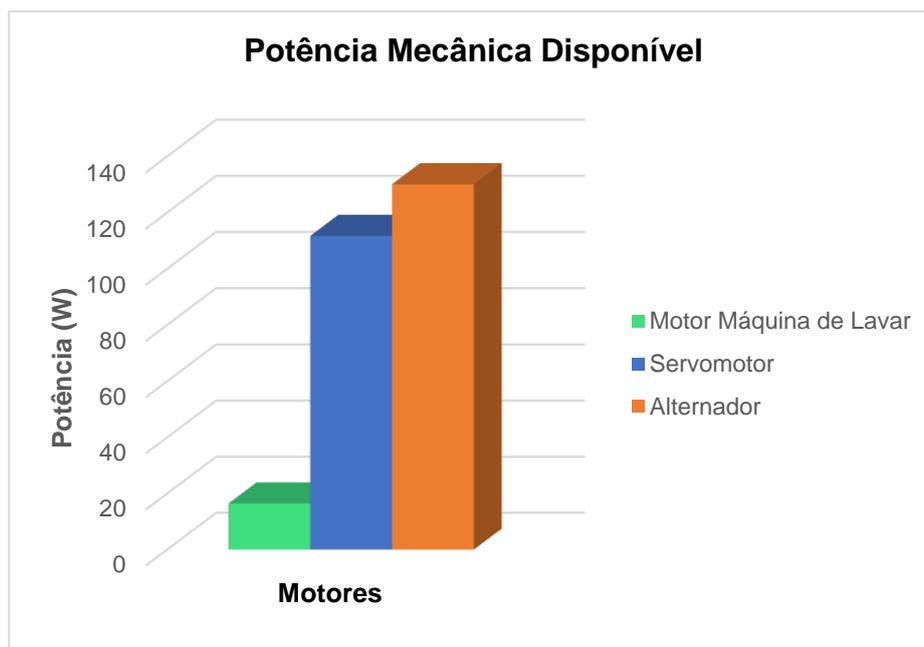


Figura 44 - Potência Mecânica Disponível

Cálculo das Eficiências

A eficiência eólica-mecânica é representada pelos dados da potência eólica e potência mecânica (W), para cada sistema de geração, conforme equação (4).

A eficiência mecânica-elétrica é representada pelos dados da potência mecânica e potência elétrica (W), para cada sistema de geração, conforme equação (5).

A eficiência eólica-elétrica é representada pelos dados da potência eólica e potência elétrica (W), para cada sistema de geração, conforme equação (6).

Na Tabela 23 foram inseridos os dados sobre a eficiência eólica/mecânica obtida nos sistemas de acordo com a variação das cargas resistivas montadas em paralelo, em relação a uma velocidade média do vento 12,84 m/s, gerando uma potência eólica de 2593,17 W.

Tabela 23 – Eficiência Eólica-Mecânica

	Motor Máquina de Lavar	Servomotor	Alternador

Carga	Velocidade Vento m/s	Potência Eólica (W)	Potência Mecânica (W)	% Eficiência Eólica/Mecânica	Potência Mecânica (W)	% Eficiência Eólica/Mecânica	Potência Mecânica (W)	% Eficiência Eólica/Mecânica
Circuito Aberto	12,84	2593,17	16,44	0,63	111,70	4,31	130,08	5,02
10 K \square	12,84	2593,17	16,44	0,63	111,70	4,31	130,08	5,02
5 K \square	12,84	2593,17	16,44	0,63	111,70	4,31	130,08	5,02
3,33 K \square	12,84	2593,17	16,44	0,63	111,70	4,31	130,08	5,02
2,5 K \square	12,84	2593,17	16,44	0,63	111,70	4,31	130,08	5,02
2 K \square	12,84	2593,17	16,44	0,63	111,70	4,31	130,08	5,02

Ao observar a Figura 45 é possível estabelecer um comparativo entre a potência eólica e a potência mecânica, permitindo verificar qual o sistema evidenciou a melhor eficiência eólica/mecânica em %. O alternador mostrou-se mais eficiente com um percentual de 5,02%. O servomotor revelou uma eficiência de 4,31% e o motor máquina de lavar um percentual de 0,63%.

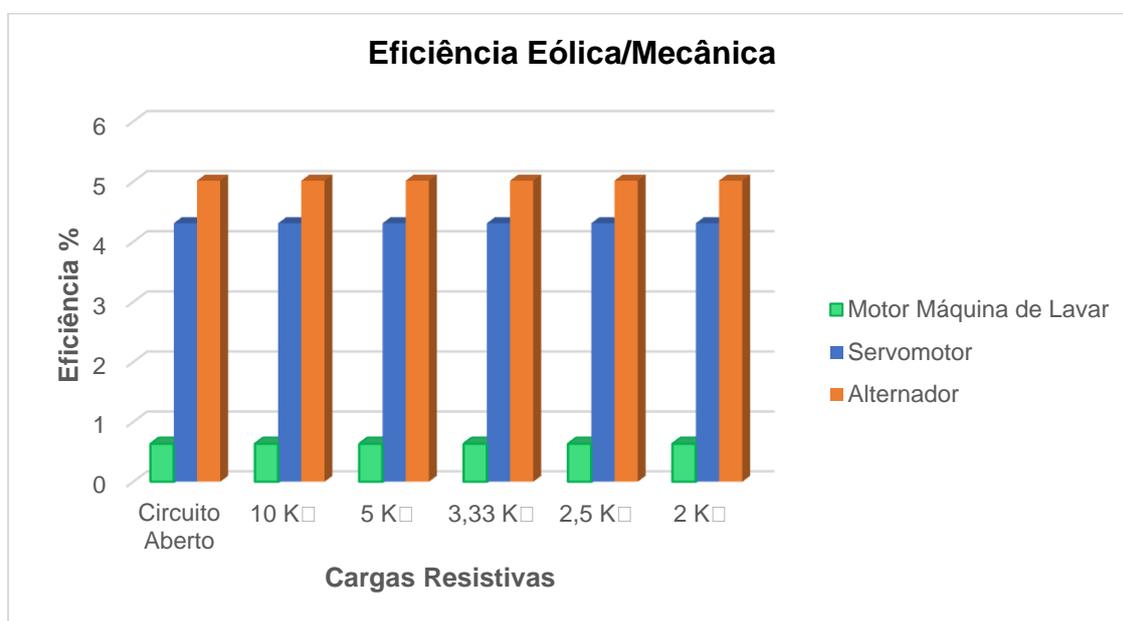


Figura 45 - Eficiência Eólica/Mecânica

Na Tabela24 estão os dados referentes a eficiência mecânica-elétrica obtida nos sistemas de acordo com a variação das cargas resistivas montadas em paralelo.

Tabela 24 – Eficiência Mecânica/Elétrica

Motor Máquina de Lavar	Servomotor	Alternador
------------------------	------------	------------

Carga	Potência (W)	Potência Mecânica (W)	% Eficiência Mecânica / Elétrica	Potência (W)	Potência Mecânica (W)	% Eficiência Mecânica / Elétrica	Potência Gerador/ Bateria (W)	Potência Mecânica (W)	% Eficiência Mecânica / Elétrica
Circ.Aberto	0	16,44	0	0	111,70	0	0	130,08	0
10 K \square	2,89	16,44	17,56	0,02	111,70	0,02	15,22	130,08	11,70
5 K \square	2,75	16,44	16,74	1,59	111,70	1,42	13,94	130,08	10,71
3,33 K \square	1,50	16,44	9,10	3,62	111,70	3,24	8,90	130,08	6,85
2,5 K \square	1,02	16,44	6,23	8,32	111,70	7,44	11,48	130,08	8,82
2 K \square	1,15	16,44	7,00	8,36	111,70	7,48	11,33	130,08	8,71

Na Figura 46 é possível verificar qual o sistema apresentou a melhor eficiência mecânica/elétrica em %. O sistema que utilizou o motor máquina de lavar mostrou-se mais eficiente para as cargas resistivas de 10 k \square , 5 k \square e 3,33 k \square com os percentuais de 17,56%, 16,74% e 9,10%.

O servomotor apresentou as melhores eficiências, 7,48% e 7,44% para as cargas de 2 k \square e 2,5 k \square . O alternador apresentou as eficiências de 11,70% para uma resistência de 10 k \square e 10,71% para 5 k \square .

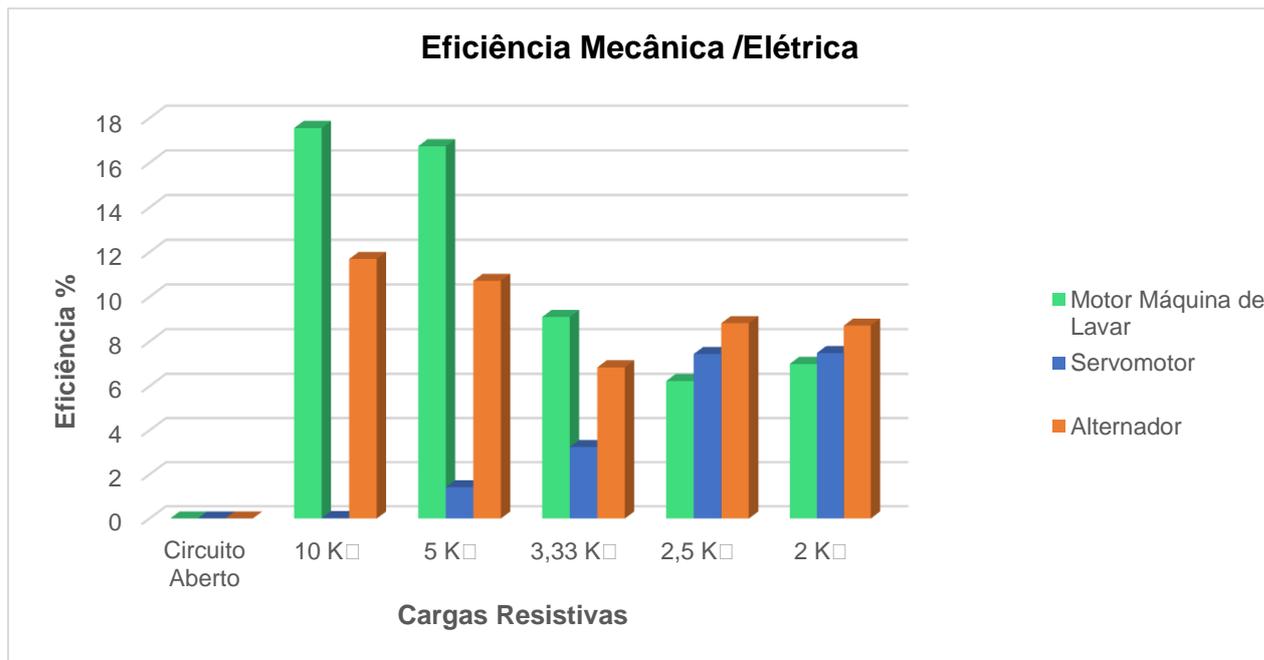


Figura 46 - Eficiência Mecânica/Elétrica

Na Tabela 25 descrevem-se os dados sobre a eficiência eólica/elétrica obtida nos diferentes sistemas de acordo com a variação das cargas resistivas.

Tabela25 – Eficiência Eólica/Elétrica

Carga	Motor Máquina de Lavar				Servomotor		Alternador	
	Velocidade Vento m/s	Potência Eólica (W)	Potência (W)	% Eficiência Eólica / Elétrica	Potência (W)	% Eficiência Eólica / Elétrica	Potência Gerador/ Bateria (W)	% Eficiência Eólica / Elétrica
Circ.Aberto	12,84	2593,17	0	0	0	0	0	0
10 K \square	12,84	2593,17	2,89	0,1113	0,02	0,0009	15,22	0,5868
5 K \square	12,84	2593,17	2,75	0,1061	1,59	0,0612	13,94	0,5375
3,33 K \square	12,84	2593,17	1,50	0,0577	3,62	0,1394	8,90	0,3434
2,5 K \square	12,84	2593,17	1,02	0,0395	8,32	0,3207	11,48	0,4425
2 K \square	12,84	2593,17	1,15	0,0444	8,36	0,3223	11,33	0,4371

Na Figura 47, é possível estabelecer um comparativo entre a potência eólica e a geração de energia elétrica. O sistema de geração que utilizou o servomotor, obteve um percentual de eficiência de 0,06% para uma carga resistiva de 5 k \square e 0,32% para uma carga de 2 k \square .

O sistema que utilizou o alternador indicou o percentual de eficiência de 0,58% para uma carga resistiva de 10 k \square e 0,34% para 3,33 k \square .

O sistema que utilizou o motor máquina de lavar se mostrou o menos produtivo, com o menor percentual de eficiência, de 0,11% para 10 k \square e 0,04% para uma carga de 2,5 k \square .

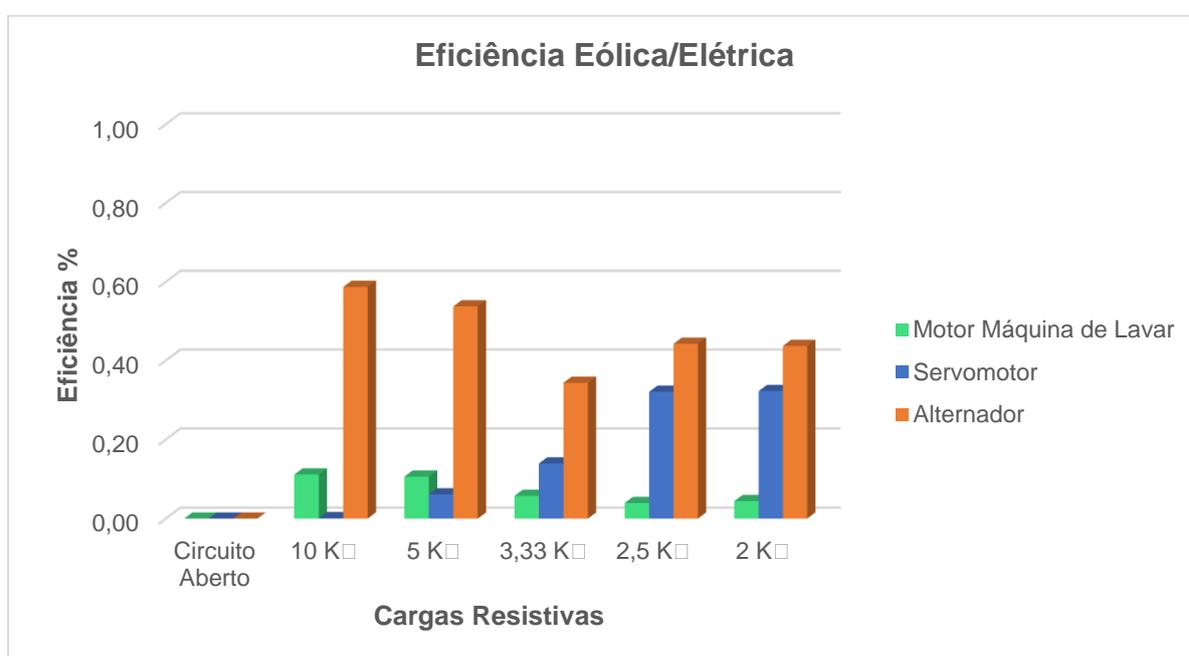


Figura 47 - Eficiência Eólica/Elétrica

Na Tabela 26 estão dos dados referentes as eficiências médias obtidas nos diferentes sistemas.

Tabela 26 – Eficiências Médias %

Motores	Eficiência Eólica/Mecânica	Eficiência Mecânica/ Elétrica	Eficiência Eólica/Elétrica
Motor Máquina de Lavar	0,63	11,33	0,07
Servomotor	4,31	3,92	0,17
Alternador	5,02	9,36	0,47

Ao analisar a Figura 48 percebe-se que o sistema que utilizou o alternador foi o que obteve a maior média de eficiência eólica/mecânica, que atingiu 5,02%, seguido do servomotor com 4,31% para esta eficiência. O motor máquina de lavar apontou a menor eficiência eólica/mecânica esta foi de 0,63%. O sistema que utilizou o motor máquina de lavar apresentou a maior eficiência mecânica/elétrica 11,33% seguido do sistema que operou com o alternador 9,36% e o servomotor apresentou 3,92%. Já para as eficiências eólica/elétrica, todos os sistemas indicaram percentuais baixos estes ficaram entre 0,07% até 0,47%.

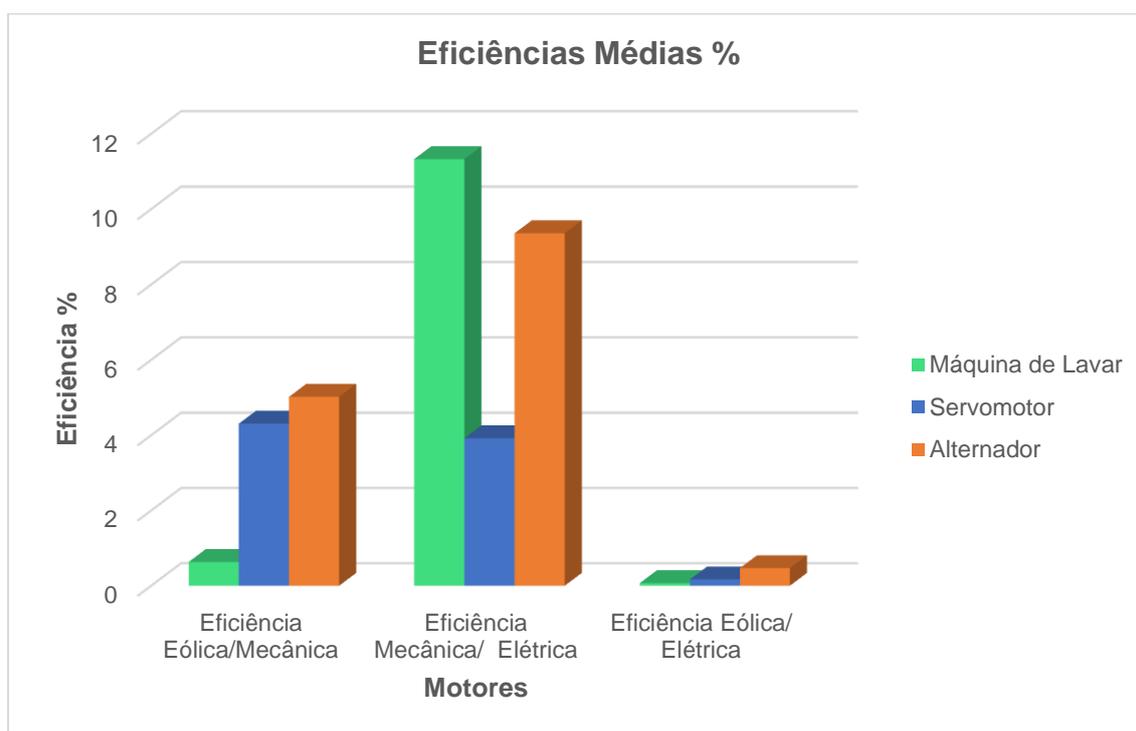


Figura 48 - Eficiências Média %

Custo unitário da energia gerada

Na Tabela 27 foram descritos os dados referentes aos custos iniciais e de manutenção para a instalação dos diferentes sistemas de geração de energia.

Tabela 27 – Custos dos Sistemas

	Motor Máquina Lavar	Servomotor	Alternador
Custo inicial do sistema em R\$ (turbina +motor)	2.263,07	2.462,57	1.776,07
Vida útil (anos)	20	20	20
Custo de manutenção aa em R\$ (2% do custo inicial)	45,26	49,25	35,52

Considerando uma vida útil da bateria automotiva de 4 anos e uma taxa de juros 10% aa, o custo anual da bateria utilizada no sistema de geração com o alternador foi de R\$ 141,66.

De modo semelhante, utilizando uma taxa de juros 10% aa, e uma vida útil de 20 anos, foram calculados os custos anualizados do motor da máquina de lavar, do servomotor e do alternador automotivo, conforme resultados expostos a seguir:

Custo Anual motor máquina lavar = 265,80 + custo manutenção

Custo Anual motor máquina lavar = R\$ 311,06 /aa

Custo Anual servomotor = 289,23 + custo manutenção

Custo Anual servomotor = R\$ 338,48 /aa

Custo Anual alternador = 208,61 + custo anual da bateria + custo anual de manutenção

Custo Anual alternador = R\$ 385,79 /aa

Considerando que o sistema de energia irá trabalhar 7884 h/ano, os cálculos das energias totais, por gerador utilizado, são exemplificados a seguir:

Energia Total Anual Máquina Lavar = 1,86 x 7884

Energia Total Anual Máquina Lavar = 14,6642 kWh/ano

Energia Total Anual Servomotor = 4,38 x 7884

Energia Total Anual Servomotor = 34,5319 kWh/ano

Energia Total Anual Alternador = 12,17 x 7884

Energia Total Anual Alternador = 95,9483 kWh/ano

Na Tabela 28 estão dos dados referentes aos custos de investimento anual, a energia anual gerada (kWh/ano) e o custo da energia gerada pelos sistemas em (R\$/kWh).

Tabela 28 – Custos x Energia Gerada

Sistemas	Custos Anual Investimento (R\$)	Energia anual gerada (kWh)	Custo Energia Gerada (R\$/kWh)
Motor Máquina de Lavar	311,06	14,66	21,21
Servomotor	338,48	34,53	9,80
Alternador	385,79	95,95	4,02

Na Figura 49, é possível estabelecer um comparativo entre a energia gerada (kWh) e o custo da energia gerada em (R\$/kWh) para cada sistema. O alternador gerou uma energia anual de 95,95 kWh e o custo da energia foi de R\$ 4,02 / kWh, esse sistema foi o que apresentou o melhor custo unitário.

O servomotor gerou uma energia anual de 34,53 kWh e o custo da energia R\$ foi de 9,80/ kWh.

O sistema que utilizou o motor máquina de lavar gerou uma energia anual de 14,6642 kWh e o custo da energia foi de R\$ 21,21 /kWh.

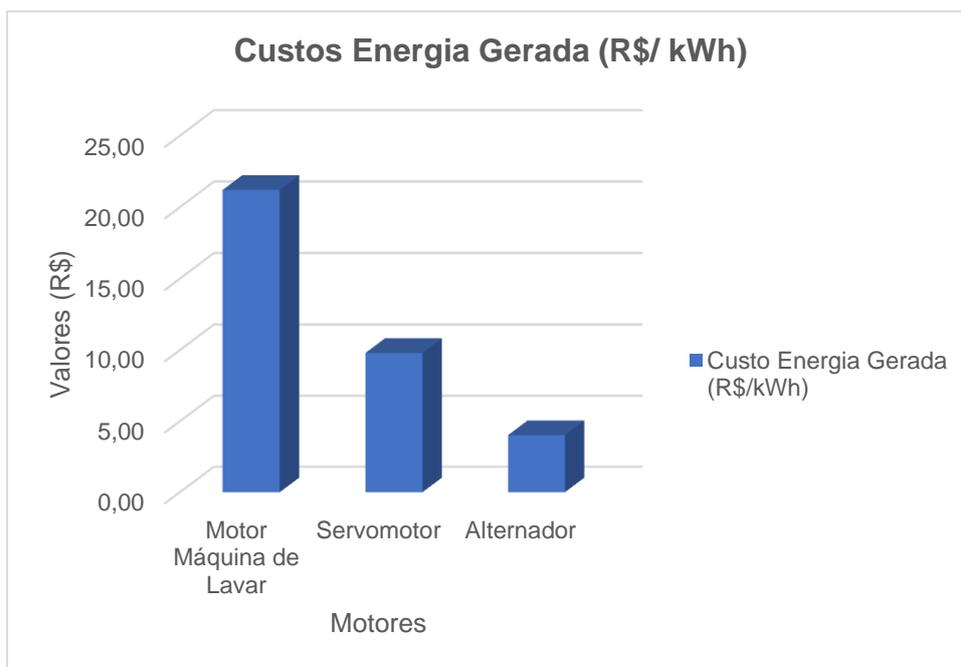


Figura 49 - Custos Energia Gerada (R\$/ kWh)

Comparando com os dados dos leilões realizados em dezembro de 2017, a energia eólica obteve um preço médio de comercialização de R\$ 0,19 por kWh, os custos da energia gerada (R\$/kWh) pelos sistemas analisados foram superiores aos valores finais praticados pelo mercado.

A Figura 50 representa os dados da geração de energia de um aerogerador de eixo vertical com base em um fluxo axial levitável magneticamente permanente gerador de ímã desenvolvido no Paquistão (AHMAD, 2017). Com uma velocidade do vento de 2 m/s e com um conjunto de resistências de 6000 Ω , atingiu uma tensão de aproximadamente 8 V e uma corrente de 1,37 mA, resultando assim em uma potência de 11 mW.

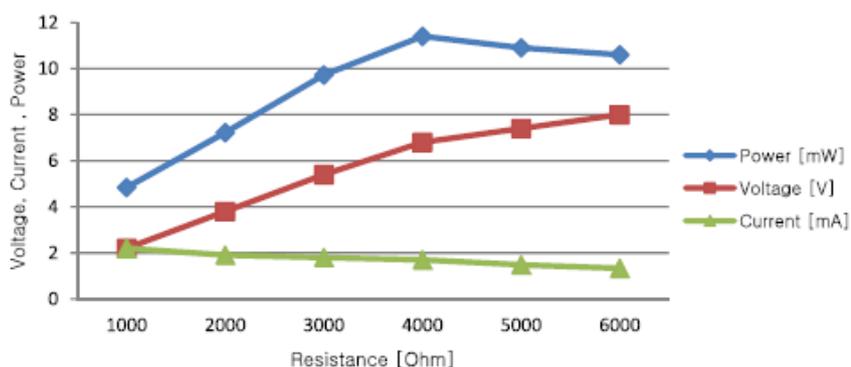


Figura 50 - Geração de Energia com velocidade do vento 2 m/s
Fonte: Ahmad, 2017

Conforme o trabalho desenvolvido por Haroub (2015), que utiliza um motor com ímãs permanentes, com a velocidade do vento de 8 m/s, o aerogerador gerou uma potência de 96 W e atingiu uma rotação de 140 rpm.

De acordo com o trabalho desenvolvido por Dal Ponte (2017), que utiliza um alternador, com uma velocidade média 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.

5. CONCLUSÃO

Após os testes realizados em uma turbina de eixo vertical, utilizando diferentes tipos de motores, foi possível verificar uma eficiência eólico-mecânica de 0,63% para o sistema da máquina de lavar, de 4,31% para o sistema do servomotor, e de 5,02% para o alternador, sendo esta a maior eficiência encontrada. A eficiência mecânico-elétrica apresentada pelo sistema máquina de lavar foi de 11,33%, do servomotor foi de 3,92%, e do alternador foi de 9,36%. Neste caso, o sistema que apresentou o melhor desempenho foi o da máquina de lavar. Por fim, na eficiência eólico-elétrica, o sistema máquina de lavar apresentou um valor de 0,07%, o servomotor um valor de 0,17%, e o alternador um valor de 0,47%. Para esta eficiência, o sistema com maior valor foi o alternador. Os sistemas estudados mostraram índices baixos de eficiência, devido às características das cargas resistivas utilizadas, dos sistemas de geração que foram adaptados e da própria eficiência da turbina eólica.

O sistema que utilizou a máquina de lavar gerou 14,66 kWh por ano, com um custo de R\$ 21,21 /kWh, o servomotor gerou 34,53 kWh por ano, com um custo de R\$ 9,80/ kWh, e o alternador gerou 95,95 kWh por ano, com um custo de R\$ 4,02 /kWh, sendo este o sistema com melhor custo unitário. Por meio da análise de viabilidade econômica, verificou-se que os sistemas apresentaram custos elevados da energia gerada, quando comparados com a tarifa de energia elétrica cobrada pela Copel, cujo valor, para o subgrupo B2 rural, é de R\$ 0,48 /kWh, com impostos.

O objetivo de fazer a avaliação técnico-econômica de uma turbina de eixo vertical utilizando diferentes tipos de motores foi alcançado, porém, visando melhorar a eficiência, são sugeridas algumas ações que poderão ser realizadas em trabalhos futuros, tais como: testar outros tipos de geradores, alterar as cargas utilizadas, remodelar a turbina eólica, dentre outras possibilidades.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD G; AMIN U. **Design, construction and study of small scale vertical axis Wind turbine based on a magnetically levitated axial flux permanent magnet generator**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101 (2017) journal home page: www.elsevier.com/locate/renene Acesso em: Jan 2018.

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: Abr 2017.

Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim Anual de Geração Eólica 2016**. Disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br/>. Acesso em: Abr 2017.

Associação Brasileira de Energia Eólica. **Dados Mensais ABEEólica – janeiro/2018**. Disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br/>. Acesso em: Mar 2018.

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: Mai 2016.

BARLOW J. B., RAE W. H., POPE A., 1999, “Low-Speed Wind Tunnel Testing”, 3rd edition; John Wiley & Sons.

BLASQUES, L. C. M. **Estudo da viabilidade técnico–econômica de sistemas híbridos para geração de eletricidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2005, 215 p.

BRAGA, Newton C.. **Como funciona o alternador**. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/51-automotivos/709-comofunciona-os-alternadores-art094.html> Acesso em: Abr 2017.

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.

BONELLI, A. F. **Modelagem e simulação de unidade eólica para estudos de indicadores de qualidade de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, 2010, 84 p.

BHUTTA, M. M. A., HAYAT N., FARROQ A. U., ALI Z., JAMIL Sh. 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 2016.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.copel.com.br/> Acesso em: Jan 2018.

CHAPMAN, S. J. **Fundamento de máquinas elétricas**. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013, 700 p.

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: Set 2016.

CRESESB - **Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Energia Eólica Princípios e Tecnologias**, 2008.

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

DAL PONTE, F. E. **Construção e avaliação de um aerogerador de eixo vertical aplicado à agroindústria**. 2017. [Dissertação Mestrado]. UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017, Cascavel, PR.

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

DUTRA, R. M.; TOLMASQUIM, M. T. **Estudo da viabilidade econômica para projetos eólicos com base no novo contexto do setor elétrico**. Revista Brasileira de Energia, Itajuba, v. 9, n. 1, 2002.

GOMES, L. E. B.; HENKES, J. A. **Análise da energia eólica no cenário elétrico: aspectos gerais e indicadores de viabilidade econômica**. Gestão e Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis - Sc, v. 3, n. 2, p.463-482, mar. 2015.

GOECKI, J. P. **Túneis aerodinâmicos: passado, presente e futuro**. Encit 88 – II Encontro Nacional de Ciências Térmicas. Águas de Lindóia – SP, 1988.

GRAUERS, A. **Generators for Gearless Wind Energy Converters**. Proc. Of European Union Wind Energy Conference and Exhibition. Göteborg. Sweden. p. 418-21. May,1996.

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.

HIRSCHFELD, H. **Engenharia econômica e análise de custos: aplicações práticas para economistas, engenheiros, analistas de investimentos e administradores** – 7ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2000.

ITA – **Instituto Tecnológico de Aeronáutica**. Disponível em:
<<http://www.ita.br/noticias/embraertestaaeronavesnotneldeventodoita>> Acesso em:
Mai 2017.

JUNIOR, F.G.C.J; RODRIGUES, G.M. **Um Estudo sobre a Energia Eólica no Brasil**, revista Ciência Atual, v. 5, n. 1, p.02-13, Rio de Janeiro, 2015.

LINHA MINIPA. **Catálogo de Produtos**. Disponível em:
<http://www.minipa.com.br/Content/img/Catalogos/Arquivo/catalogo.pdf> Acesso: Jun.
2017.

LINHA TENMA. **Catálogo de Produtos**. Disponível em:
<http://www.powertronics.com.br/fabricante/tenma> Acesso: Jan 2018.

LOPEZ, R. A. **Energia Eólica**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2012.
LUZIO, E. **Finanças corporativas teoria e prática**. 2 ed. Rio de Janeiro: Senac Rio,
2014. 384 p.

MARQUES, J. **Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica),
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, 2004, 158 p.

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.

MELEK, V. C. **Estudo comparativo da viabilidade econômica entre uma usina eólica e uma usina híbrida (eólico-fotovoltaica)**. Trabalho de conclusão de curso
(Especialização em Eficiência Energética), Universidade Tecnológica Federal de Paraná – UTFPR. Curitiba, 2013, 86 p.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Energia Eólica**. Disponível em:
<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica> .
Acesso em: Dez 2015.

MOREIRA, J.O. **Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas**. 2009. [Tese Doutorado].
UNESP – Universidade Estadual Paulista, 2009, São Paulo, SP.

OLIVEIRA, T. F. F; SANTOS, H. I. **Uso da energia eólica como alternativa para mitigar o Agravamento do efeito estufa**. Universidade Católica de Goiás.
Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental. 2008.

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

POPE, A., Low Speed Wind Tunnel Testing, New York, N.Y., John Wiley& Sons,
PICOLO, A. P.; BÜHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. **Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Araranguá, v. 36, n. 4, p.2-13, 26 jun. 2014.

PINTO, M. O. **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: 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: Jun 2016.

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

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

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: Set 2015.

WEG. **Catálogo de Produtos**. Disponível em:<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/1-328.pdf>> Acesso em: Mai 2017.

WILDI, T. **Electrical machines, drives and power systems – Pearson new international edition**. 6 ed., Boston: Pearson Education, 2013, 926 p.