

unesp  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

HADRIAN MADURO RAMOS

MICROGERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM ENERGIA EÓLICA

Guaratinguetá
2016

HADRIAN MADURO RAMOS

MICROGERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM ENERGIA EÓLICA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá
2016

Ramos, Hadrian Maduro
R175m Microgeração de eletricidade com energia eólica / Hadrian Maduro
Ramos. – Guaratinguetá, 2016.
62 f : il.
Bibliografia: f. 61-62

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.
Orientador: Teófilo Miguel de Souza

1. Energia eólica 2. Energia - Fontes alternativas 3. Energia elétrica -
Produção I. Título

CDU 620.91

HADRIAN MADURO RAMOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Me. THAÍS SANTOS CASTRO
DEE/UNESP-FEG


Eng. Eletricista EVALDO CHAGAS GOUVÊA
Membro externo

Dezembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força, coragem e inteligência com que Ele me presenteou,
a minha mãe Denise Maria Gonçalves Maduro Ramos pelo amor, inspiração, motivação
e apoio nos momentos difíceis,

ao meu pai Lucio Carlos Meireles Ramos pelo amor e disponibilidade nos momentos
bons e ruins,

a minha irmã Nathane Maduro Ramos pela enorme ajuda,

ao meu irmão Renan Maduro Ramos, que mesmo longe, manteve-se sempre presente,

ao meu orientador Teófilo Miguel de Souza pela confiança e oportunidade concedida.

“Quem quiser ser líder deve ser primeiro servo.
Se você quiser liderar, deve servir.”

Jesus Cristo

RAMOS, H. M. **Microgeração de eletricidade com energia eólica**. 2016. 62 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Univ Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Este trabalho apresentou o estudo de um sistema de microgeração de energia eólica utilizando o aerogerador Air Silent X da empresa Primus Wind Power. Os experimentos foram realizados no Centro de Energias Renováveis do Campus da UNESP de Guaratinguetá. Foram analisados os custos envolvidos na instalação e manutenção, além do tempo de retorno do investimento. Para coleta de dados foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados utilizando a plataforma Arduino UNO ligado entre o aerogerador e uma bateria de chumbo selada recarregável. Foram coletadas medidas de energia elétrica, que foram usadas no cálculo da energia média gerada. Também foi medida a tensão da bateria. Os resultados indicaram que a instalação em Guaratinguetá do aerogerador usado neste estudo não é eficiente devido aos baixos valores de velocidade média do vento na região. Porém, um aerogerador que seja capaz de gerar energia elétrica a partir de velocidades de vento menores pode ser vantajoso.

PALAVRAS-CHAVE: Microgeração eólica. Aerogerador. Energia renovável. Energia eólica.

RAMOS, H. M. **Microgeneration of Electricity using Wind Energy**. 2016. 62 f. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Univ Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

This paper has presented the study of a wind power microgeneration system with wind turbine Air Silent X manufactured by Primus Wind Power. The experiments have been performed at the Center of Renewable Energies of UNESP's Guaratinguetá Campus. The payback, the installation and maintenance costs were analyzed. A data acquisition system, that was connected between the wind turbine and a rechargeable sealed lead battery, was built for data collection using the Arduino UNO platform. Electrical energy was measured and they were used to calculate the average energy generated. The battery voltage was also measured. The results showed that the installation of the wind turbine studied on this paper in Guaratinguetá is not efficient due to the low values of the average wind speed in the region. However, a wind turbine that is capable of generating electricity from lower wind speeds may be advantageous.

KEYWORDS: Wind power microgeneration. Wind turbine. Renewable energy. Wind energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação de renováveis na matriz energética no Brasil e no mundo.....	12
Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira, 2014 - 2015.....	12
Figura 3 – Participação de renováveis na matriz elétrica no Brasil e no mundo.....	13
Figura 4 – Capacidade cumulativa de energia eólica instalada no mundo, 2000-2015.....	15
Figura 5 – Geração total de energia eólica no Brasil em GWh, 2006-2015.....	18
Figura 6 – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro	19
Figura 7 – Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica.....	22
Figura 8 – Mecanismo de formação dos ventos	25
Figura 9 – Diagrama de bloco de um sistema eólico.....	26
Figura 10 – Aerogeradores com rotores de eixo vertical: (a)Darrieus; (b)Savonius.....	27
Figura 11 – Aerogeradores com rotores de eixo horizontal	29
Figura 12 – Esquema básico de uma turbina eólica	29
Figura 13 – Fluxo de ar através de uma área transversal A.....	33
Figura 14 – Perda de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.....	35
Figura 15 – Distribuição do coeficiente de potência c_p em função de v_3/v_1	37
Figura 16 – Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador	38
Figura 17 – Curvas características de c_p em função de λ e β	39
Figura 18 – Tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações	39
Figura 19 – Configuração de um sistema eólico isolado.....	40
Figura 20 – Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.....	41
Figura 21 – Parque eólico conectado à rede: Parque Eólico da Prainha – CE	42
Figura 22 – Parque eólico instalado no Mar do Norte.....	43
Figura 23 – Esquema de montagem do circuito	44
Figura 24 – Foto de montagem do circuito	45
Figura 25 – Multímetro digital Sunwa DT – 830B	45
Figura 26 – Esquema elétrico do Sistema de Aquisição de Dados	46
Figura 27 – Foto do Sistema de Aquisição de Dados.....	47
Figura 28 – Curva de potência de saída do aerogerador versus velocidade do vento	48
Figura 29 – Foto do aerogerador utilizado	49
Figura 30 – Aproximação do gráfico de potência do aerogerador para uma reta	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade de energia eólica instalada no mundo (em MW)	16
Tabela 2 – Usinas eólicas de maior potência em operação no Brasil.....	20
Tabela 3 – Capacidade de energia eólica instalada no Brasil por estado (em MW)	21
Tabela 4 – Fator de rugosidade do terreno	34
Tabela 5 – Especificações técnicas do aerogerador Air Silent X.....	48
Tabela 6 – Velocidade média sazonal de vento a 50 metros de altura (m/s).....	51
Tabela 7 – Potência média teórica de saída do aerogerador (W)	53
Tabela 8 – Energia média teórica de saída do aerogerador (Wh/mês)	53
Tabela 9 – Dados obtidos com os experimentos	53
Tabela 10 – Energia média do aerogerador (Wh/mês).....	55
Tabela 11 – Modelos de aerogeradores e seus preços	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	10
1.2	MOTIVAÇÃO.....	10
1.3	ENERGIA EÓLICA NO MUNDO	14
1.4	ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....	18
1.5	IMPORTÂNCIA DA ENERGIA EÓLICA	21
1.6	OBJETIVO	23
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	PARTE TEÓRICA	25
2.1	PROCESSO DE FORMAÇÃO DOS VENTOS	25
2.2	AEROGERADORES	26
2.2.1	Rotores de eixo vertical	27
2.2.2	Rotores de eixo horizontal	28
2.2.3	Mecanismo de controle de aerogeradores	30
2.3	CONCEITOS DA ENERGIA EÓLICA.....	33
2.4	SISTEMAS EÓLICOS	39
2.4.1	Sistemas Isolados	40
2.4.2	Sistemas Híbridos	40
2.4.3	Sistemas Interligados à rede	41
2.4.4	Sistemas <i>Offshore</i>	42
3	PARTE EXPERIMENTAL	44
3.1	MONTAGEM DO EXPERIMENTO E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	44
3.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SAD).....	46
3.3	AEROGERADOR AIR SILENT X	47
3.4	MÉTODO	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	CÁLCULOS DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	51
4.2	CÁLCULOS DA ENERGIA GERADA A PARTIR DO EXPERIMENTO	53
4.3	CUSTOS ENVOLVIDOS E DISCUSSÕES.....	55
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente trabalho apresenta o estudo de um sistema de microgeração de energia eólica utilizando o aerogerador Air Silent X da empresa Primus Wind Power, localizado no Centro de Energias Renováveis do Campus da UNESP de Guaratinguetá. O aerogerador utilizado nos experimentos teve sua hélice original substituída por uma hélice de policloreto de vinila (PVC).

Com a montagem de um sistema de aquisição de dados, utilizando a plataforma Arduino UNO, foram medidas as quantidades de energia geradas diariamente.

A partir de uma análise, posterior à obtenção dos dados, foi possível quantificar a energia gerada pelo vento no período de um ano. Posteriormente, procedeu-se a análise de implementação do sistema de microgeração e o tempo de retorno do investimento.

1.2 MOTIVAÇÃO

Com o advento da Revolução Industrial e introdução da energia elétrica como força motriz para as máquinas, em especial a partir da segunda metade do século XX, viu-se o surgimento e crescimento de inovações tecnológicas aplicadas à produção. Este crescimento criou uma dependência da energia elétrica como meio para o desenvolvimento econômico, o qual está cada vez mais atrelado à disponibilidade desta fonte de energia (SILVA, 1999).

Os países há muito se preocupam com a imperiosa necessidade do suprimento de energia elétrica para atender necessidades econômicas e necessitam cada vez mais dela para se desenvolverem. Desse modo, a energia é um fator determinante para o desenvolvimento econômico e social ao fornecer apoio mecânico, térmico e elétrico às ações humanas.

A humanidade tradicionalmente baseou sua política energética na utilização de combustíveis fósseis, tendo estes como principal integrante da matriz energética. Entretanto, pesquisas para a busca de fontes de energias alternativas eram comuns (MONTEZANO, 2012).

Com os baixos preços do petróleo e construção de usinas hidrelétricas e termelétricas, até a década de 1970, os projetos de pesquisas para a busca de fontes de energias alternativas foram desativados. O começo da escassez dos combustíveis fósseis, sua concentração em

pequenos grupos de países produtores e a crescente preocupação com problemas ambientais fizeram com que as políticas energéticas no mundo precisassem ser revistas, dando início a uma busca incansável por fontes alternativas de energia que pudessem suprir esta escassez (FLEMING, 2009).

Em outubro de 1973, a economia mundial foi fortemente prejudicada pelo choque das altas sucessivas do preço do petróleo. O primeiro aumento do petróleo elevou o preço do barril de US\$ 1,77 em 1972, para US\$ 11,65 em novembro de 1973. Depois de cinco anos de relativa estabilidade, um novo choque elevou o preço de referência do barril de petróleo para valores superiores a US\$ 35,00/barril no decorrer do quarto trimestre de 1979. Todos os países importadores pertencentes a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) reagiram com rapidez à elevação dos preços. A *International Energy Agency* (IEA), criada em 1974, diante desse problema, propôs para os países membros da OCDE diretivas para a redução da parte do petróleo da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) em seus abastecimentos energéticos. Nas diretivas propostas, três eram os objetivos gerais (MARTIN, 1992):

- Diversificar as fontes de importação de petróleo;
- Substituir o petróleo por outras fontes de energia;
- Utilizar a energia com mais racionalidade.

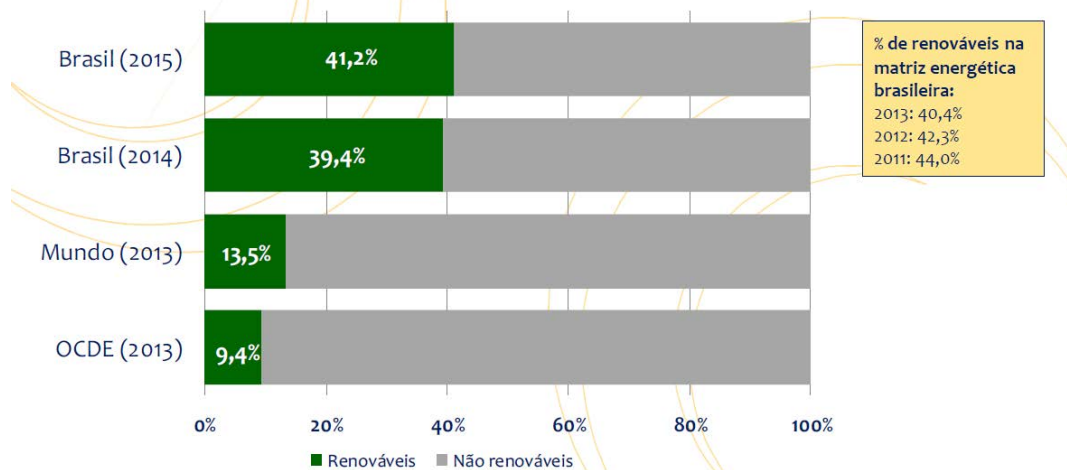
As grandes pressões ambientais sobre o uso da energia nuclear, marcadas fortemente pelos acidentes nos reatores de *Three Mile Island* em 1979, nos Estados Unidos e, mais tarde, em 1986 na cidade de *Chernobyl*, na ex-União Soviética, forçaram a comunidade mundial a procurar fontes mais seguras e confiáveis para o fornecimento de energia elétrica. Dentro dos novos paradigmas em relação às fontes limpas, predominantemente nas décadas de 1980 e 1990, criou-se um ambiente favorável e altamente promissor para o desenvolvimento das fontes renováveis de energia (TOLMASQUIM, 2003).

Consoante esta preocupação com a deterioração do ecossistema mundial, tem-se o *Protocolo de Kyoto*, que objetivou a redução da emissão de gases poluentes, causados pela queima de combustíveis fósseis, estabelecendo metas para que, a longo prazo, o efeito estufa pudesse ser reduzido, pois ele vem alterando significativamente o clima da Terra. A questão primordial neste acordo mundial foi a substituição de combustíveis sujos por fontes limpas e renováveis (FLEMING, 2009).

Diante deste cenário mundial, o Brasil vem buscando soluções para diminuir a dependência da energia gerada usando combustíveis fósseis. A Figura 1 mostra que a

participação de combustíveis fósseis na matriz energética brasileira diminuiu de 2014 para 2015. Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2016) essa diminuição deu-se devido à queda da oferta interna de petróleo e derivados (7,2%) no Brasil, em 2015. Além disso, a Figura 1 também mostra que a participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo.

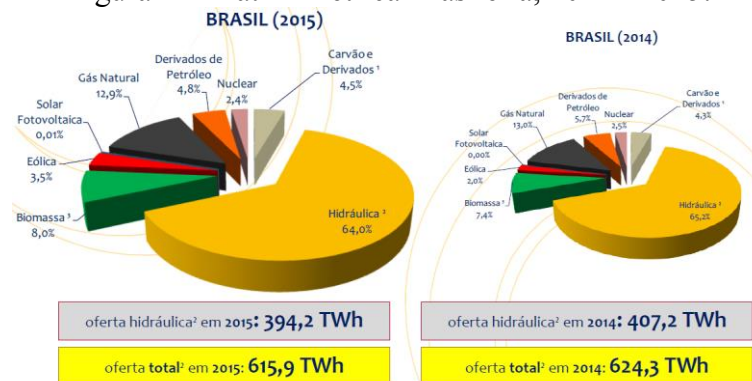
Figura 1 – Participação de renováveis na matriz energética no Brasil e no mundo.



Fonte: (EPE, 2016).

Atualmente, o Brasil sente a necessidade de diversificar sua matriz elétrica. Além da preocupação com a redução da geração de energia elétrica advinda da queima de combustíveis fósseis, há também a possibilidade da escassez do recurso hídrico, devido a ocasionais faltas de chuvas. O gráfico da Figura 2 ilustra a grande dependência que o Brasil ainda tem da energia hidrelétrica, que foi responsável por 64% da geração de eletricidade no país em 2015.

Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira, 2014 - 2015.



¹ Inclui gás de coqueria

² Inclui importação

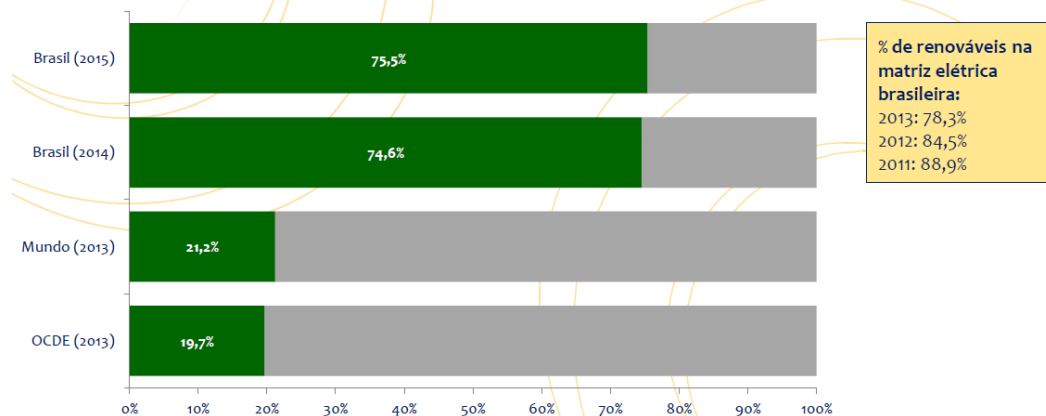
³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras fontes primárias.

Fonte: (EPE, 2016).

A Figura 2 também mostra a queda da participação da energia hidrelétrica na Matriz Elétrica Brasileira e o crescimento de algumas das outras fontes de geração de energia elétrica, como é o caso da geração eólica. Isso é possível graças à disponibilidade de várias fontes limpas e renováveis para geração de energia elétrica no Brasil. Diversos outros países não possuem recursos naturais e precisam recorrer a termelétricas para garantir o suprimento (PORTAL BRASIL, 2015).

Como ilustrado na Figura 3, a participação de renováveis na Matriz Elétrica Brasileira cresceu no último ano e é muito maior que a média mundial.

Figura 3 – Participação de renováveis na matriz elétrica no Brasil e no mundo.



Fonte: (EPE, 2016).

O avanço do setor eólico, segundo especialistas, vai representar uma energia complementar interessante para o Brasil, que hoje tem sua base de geração de energia no sistema hidrelétrico. O presidente da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Maurício Tolmasquim, afirma que há um casamento das condições eólicas e hidrelétricas no Brasil. O período de seca no Nordeste, onde se encontram aproximadamente 80% dos parques eólicos, coincide com o período chuvoso nas regiões Sul e Sudeste, onde estão os principais reservatórios de usinas hidrelétricas (PORTAL BRASIL, 2015).

Quanto à geração de energia eólica, há a possibilidade de serem desenvolvidos projetos para a microgeração através deste insumo, que foi regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2012. A microgeração de eletricidade com energia eólica alia consciência socioambiental, autossustentabilidade e economia financeira.

1.3 ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

Através da história o homem aprendeu a utilizar a força dos ventos. Pelo menos há 5000 anos os egípcios utilizavam o vento para navegação no Nilo. Mais tarde foram construídos os primeiros sistemas para moagens de grãos que tinham pás parecidas com remos (TOLMASQUIM, 2003).

Com o avanço da agricultura, o homem necessitava cada vez mais de ferramentas que o auxiliassem nas diversas etapas do trabalho. Isso levou ao desenvolvimento de uma forma primitiva de moinho de vento, que constava de um eixo vertical acionado por uma longa haste presa a ela, movida por homens ou animais caminhando numa gaiola circular. Esse sistema foi aperfeiçoado com a utilização de cursos d'água como força motriz, que deram surgimento às rodas d'água (DUTRA, 2008).

Como não se dispunha de rios em todos os lugares para o aproveitamento em rodas d'água, começaram a surgir os moinhos de vento. No século VII, na Pérsia, eles já eram utilizados para moer grãos. Apesar da baixa eficiência, os moinhos persas contribuíram para o desenvolvimento do bombeamento d'água e moagem de grãos, substituindo a força motriz humana ou animal (BOSSANYI et al., 2001).

Na Europa, os primeiros moinhos surgiram no século XII na França e Inglaterra. Como características comuns, eles possuíam na sua parte superior um eixo horizontal que suportava de quatro a oito vigas de madeira com comprimento de 3 a 9 metros. As vigas eram cobertas com telas ou pranchas de madeira e a energia gerada pelo giro do eixo era transmitida por um sistema de engrenagens para as máquinas do moinho, instaladas na base da estrutura. (ALDABÓ, 2002)

Na Holanda, a partir do século XIV, o uso de moinhos de vento em grande escala esteve amplamente relacionado com a drenagem das terras cobertas pelas águas. Entre os séculos XVII e XIX, os moinhos de vento nesse país europeu tiveram uma grande variedade de aplicações como produção de óleos vegetais, fabricação de papel, entre outras. Em meados do século XIX, existiam aproximadamente 9.000 moinhos de vento em pleno funcionamento na Holanda.

No século XX, os pequenos moinhos de vento foram utilizados para bombeamento de água e geração de energia elétrica. Nos anos 1970, com o primeiro choque do petróleo, a geração de energia elétrica via sistemas eólicos se tornou, em algumas situações, economicamente viável e estratégica para muitas nações. Muitos institutos de pesquisa

concentraram esforços no desenvolvimento de sistemas eficientes, de baixo custo e larga faixa de operação (TOLMASQUIM, 2003).

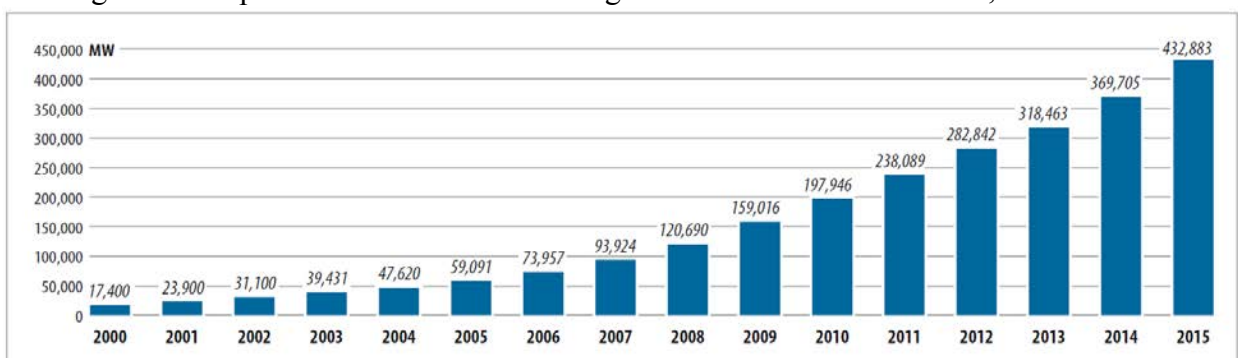
Atualmente, a energia eólica continua a ser a forma mais competitiva de adição de nova capacidade de geração de energia para a rede em um grande número de mercados em todo o mundo, mesmo quando competindo contra as tecnologias convencionais fortemente subsidiadas. Contudo, apesar da progressiva redução nos custos da geração eólica, o crescimento da indústria eólica não vai se concretizar sem a criação de novas leis.

Em 2015, o aumento da geração de energia eólica foi quase igual à metade do crescimento global de eletricidade. E, pelo segundo ano consecutivo, as emissões globais de CO₂ se mantiveram estáveis, apesar do crescimento da economia mundial. Isto foi devido à reestruturação industrial, melhoria da eficiência energética e ao crescimento substancial de energias renováveis - lideradas pelo vento (GWEC, 2016).

Em 2014 foram instalados 50 GW de energia eólica ao redor do mundo. Em 2015 foram instalados 63 GW de nova capacidade eólica, um aumento de 22%. Novas instalações de 30.753 MW na China foram responsáveis por quase metade desse crescimento (GWEC, 2016).

O gráfico da Figura 4 mostra a rápida evolução do uso da energia eólica no mundo nos últimos anos. O novo total de energia eólica no mundo foi de 432,9 GW no final de 2015, o que representa aumento cumulativo de mais de 17% em relação ao ano anterior.

Figura 4 – Capacidade cumulativa de energia eólica instalada no mundo, 2000-2015.



Fonte: (GWEC, 2016).

A indústria eólica mundial é um setor que está presente em mais de oitenta países, 26 dos quais possuem mais de 1 GW instalado, sendo 17 na Europa, quatro na Ásia-Pacífico (China, Índia, Japão e Austrália), três na América do Norte (Canadá, México, EUA), um na

América Latina (Brasil) e um na África (África do Sul). Oito destes possuem mais de 10 GW instalados.

Em 2015 a Alemanha teve a maior expansão da capacidade de energia eólica instalada dentre os países europeus, com novos 6 GW de instalação, sendo 2 GW de energia eólica *offshore*. Encerrando o ano com um crescimento de 8,6 GW, os EUA tiveram um quarto trimestre notável. A China e a Índia são países de destaque na Ásia. China, o maior mercado de energia eólica do mundo desde 2009, teve 30,8 GW de nova capacidade instalada em 2015. A China tem hoje mais de 145 GW de energia eólica instalada, mais do que em toda a União Européia. Em 2015, a China foi o primeiro país a investir mais de US\$ 100 bilhões em energias renováveis em um único ano (GWEC, 2016).

Brasil, Canadá e México também apresentaram um desenvolvimento substancial e os primeiros parques eólicos comerciais da Jordânia, Guatemala e Sérvia foram instalados em 2015. A África do Sul tornou-se o primeiro mercado africano a passar a marca de 1 GW de potência eólica instalada. A demanda por fontes de energia limpa e sustentável tende a continuar crescendo, especialmente nas economias emergentes da África, Ásia e América Latina (GWEC, 2016).

A Tabela 1 mostra a evolução dos dezesseis países com maior capacidade de energia eólica instalada no mundo nos anos de 2014 e 2015.

Tabela 1 – Capacidade de energia eólica instalada no mundo (em MW).

País	2014	2015	Crescimento anual, 2014-2015 (%)
China	114.609	145.362	26,8
EUA	65.877	74.471	13,0
Alemanha	39.128	44.947	14,8
Índia	22.465	25.088	11,6
Espanha	23.025	23.025	0,0
Inglaterra	12.633	13.603	7,6
Canadá	9.699	11.205	15,5
França	9.285	10.358	11,5
Itália	8.663	8.958	3,4
Brasil	5.962	8.715	46,1
Suécia	5.425	6.025	11,0
Polônia	3.834	5.100	33,0
Portugal	4.947	5.079	2,6
Dinamarca	4.881	5.063	3,7
Turquia	3.738	4.697	25,5
Austrália	3.807	4.187	9,9

Fonte: Adaptado de GWEC (2016).

Em 2015 o total de investimentos no setor de energia limpa atingiu um recorde de US\$ 329 bilhões, superando em 3% o recorde anterior de 2011. Os números de 2015 foram 4% maiores que em 2014, quando foram investidos US\$ 316 bilhões (GWEC, 2016).

Nos próximos anos, a grande maioria dos investimentos no setor da energia terá que ser em energias renováveis e redes de eletricidade. Assim, de cada três dólares investidos em novas usinas, dois dólares deverão ser aplicados em tecnologias renováveis. No geral, estima-se que o investimento em energia eólica será de um total de US\$ 3,6 trilhões entre 2014 e 2040, o que representa mais de um terço do investimento total em energias renováveis. Outros US\$ 7,1 trilhões terão que ser investidos para expandir e melhorar as redes de transmissão e distribuição.

Três principais tendências continuarão a impulsionar o crescimento da indústria eólica a médio prazo:

- **Clima:** a assinatura do Acordo de Paris em dezembro de 2015 foi uma agradável surpresa. As metas de longo prazo adotadas por 186 países apontam para um setor de energia 100% livre de emissões até 2050. O que significa um setor de suprimento de energia fornecido em grande parte ou totalmente por energia renovável, como a eólica e a solar;

- **Queda dos preços:** em alguns casos, energia eólica terrestre é a opção mais barata de geração de eletricidade. Em alguns lugares, os preços contratados para a energia eólica *onshore* ligados à rede giram em torno de US\$ 30,00 /MWh. Será esta a nova tendência? O tempo dirá, mas os custos da energia solar e eólica caíram drasticamente nos últimos anos, e novas e complexas estruturas de financiamento estão criando as condições para as energias renováveis serem competitivas em cada vez mais mercados. Em alguns casos isso é explicado pelos excelentes recursos eólicos destes locais.

- **Estabilidade do mercado nos EUA:** Os Estados Unidos são pioneiros na indústria eólica mundial, além de terem um dos melhores recursos eólicos do mundo. Assim, a lei para eliminação da *Production Tax Credit (PTC)* aprovada pelo Congresso dos EUA em dezembro de 2015 foi o principal apoio político federal para o setor de energia eólica.

Embora seja muito difícil transformar as tendências listadas anteriormente em previsões de mercado para os próximos anos, preve-se um período de crescimento sustentado (GWEC, 2016).

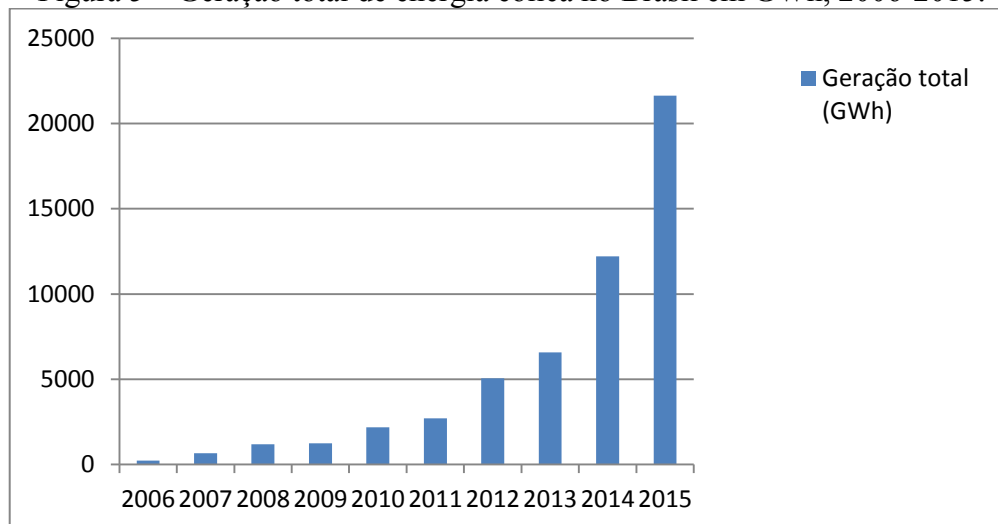
1.4 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O Brasil possui um grande potencial eólico confirmado pelas medições até outubro de 2016, e é possível produzir eletricidade a custos competitivos com centrais termelétricas, nucleares e hidrelétricas (MONTEZANO,2012).

Segundo dados do GWEC (2016), apresentados pela Tabela 1, o Brasil se encontra entre os vinte países com maior capacidade instalada de energia eólica. Dentre estes países, o Brasil apresentou o maior crescimento percentual em capacidade instalada no mundo.

A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 21.626 GWh em 2015, equivalente a um aumento de 77,1% em relação ao ano anterior, quando se atingiu 12.210 GWh (EPE, 2016). De acordo com a Figura 5, a geração eólica no Brasil vem crescendo rapidamente a partir de 2006.

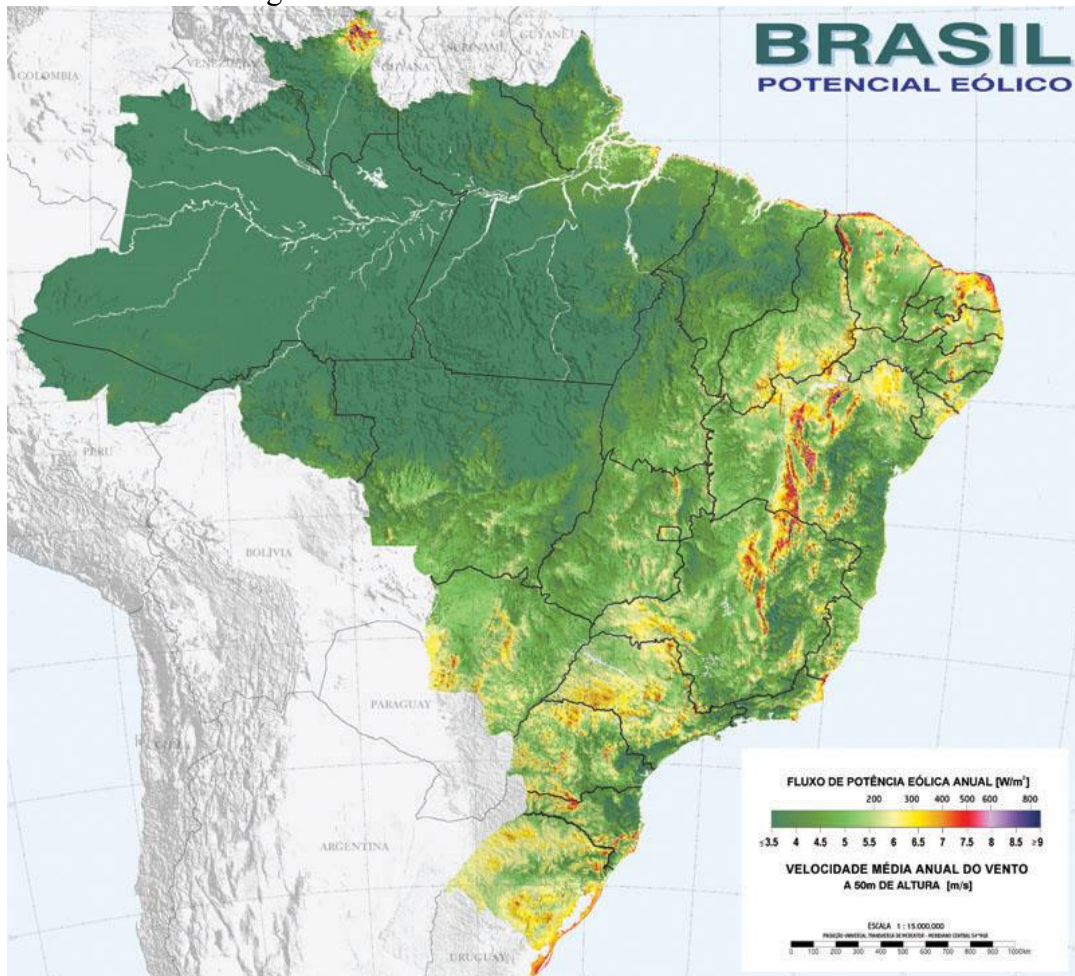
Figura 5 – Geração total de energia eólica no Brasil em GWh, 2006-2015.



Fonte: Autor.

No Brasil, assim como em várias partes do mundo, quase não existem dados de vento com qualidade para uma avaliação do potencial eólico. Entretanto, diante da grande necessidade da obtenção destes dados para caracterização dos recursos eólicos no país, foi lançado o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB). O mapa do Brasil com esses dados é ilustrado pela Figura 6.

Figura 6 – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.



Fonte: (DUTRA, 2008).

A grande parte da região Norte do Brasil, área colorida por verde mais escuro, no mapa da Figura 6 não possui uma base de dados de velocidades médias de vento coletados. As áreas coloridas por verde mais claro são boas para a instalação de projetos de energia eólica para bombeamento de água. As áreas em amarelo no mapa, cujas velocidades médias anuais do vento está entre 6 m/s e 7 m/s, são propícias para a microgeração de eletricidade a partir da energia eólica. Já as áreas em vermelho, que possuem velocidade média anual de vento superior a 7 m/s, são ideais para o uso da energia eólica na geração de eletricidade.

A análise dos dados do vento dos vários locais no Nordeste confirmou algumas características da região. De acordo com Gannoum, em declaração a BARIFOUSE; SCHREIBER (2015), os ventos na região Nordeste apresentam velocidade média bem superior à necessária para geração de energia, são unidirecionais e estáveis, sem rajadas. Isso significa que a energia é produzida mais constantemente.

Segundo o Banco de Informações de Geração (BIG) pertencente à ANEEL (2016b), o Brasil possui 397 empreendimentos de fonte eólica com 9.709 MW em operação, outros 137 empreendimentos de fonte eólica em construção totalizarão 3.126 MW e ainda 218 empreendimentos previstos com construção não iniciada. A Tabela 2 ilustra as vinte usinas de maior potência em operação no contexto nacional.

Tabela 2 – Usinas eólicas de maior potência em operação no Brasil.

Usina	Potência (MW)	Município	Estado
Praia Formosa	105,00	Camocim	CE
Alegria II	100,65	Guamaré	RN
Parque Eólico Elebrás Cidreira 1	70,00	Tramandaí	RS
Rei dos Ventos 3	60,12	Galinhos	RN
Rei dos Ventos 1	58,45	Galinhos	RN
Canoa Quebrada	57,00	Aracati	CE
Eólica Icaraizinho	54,60	Amontada	CE
Alegria I	51,00	Guamaré	RN
Parque Eólico de Osório	50,00	Osório	RS
Parque Eólico Sangradouro	50,00	Osório	RS
Parque Eólico dos Índios	50,00	Osório	RS
Bons Ventos	50,00	Aracati	CE
RN 15 – Rio do Fogo	49,30	Rio do Fogo	RN
Volta do Rio	42,00	Acaraú	CE
Dunas de Paracuru	42,00	Paracuru	CE
Icaraí II	37,80	Amontada	CE
Macaúbas	35,07	Brotas de Macaúbas	BA
Barra dos Coqueiros	34,50	Barra dos Coqueiros	SE
Mussambê	32,90	Sento Sé	BA
Banda de Couro	32,90	Sento Sé	BA

Fonte: Adaptado de ANEEL (2016c).

A Tabela 3 mostra que o Nordeste é o principal polo de energia eólica no Brasil. Segundo dados publicados pela EPE (2016), o Nordeste possui 76,1% da capacidade instalada no país. O restante encontra-se, majoritariamente, na região Sul. Dos cinco maiores estados produtores, quatro são da região Nordeste, ou seja, Rio Grande do Norte, Ceará, Bahia e Piauí.

Tabela 3 – Capacidade de energia eólica instalada no Brasil por estado (em MW).

Estado	Capacidade (MW)
Rio Grande do Norte	2.368
Rio Grande do Sul	1.554
Ceará	1.253
Bahia	1.218
Piauí	503
Pernambuco	357
Santa Catarina	233
Paraíba	69
Sergipe	35
Rio de Janeiro	28
Paraná	12

Fonte: Adaptado de EPE (2016).

1.5 IMPORTÂNCIA DA ENERGIA EÓLICA

O crescimento da energia eólica no mundo tem sido uma alternativa adequada da sociedade por uma melhor qualidade ambiental no suprimento energético. O crescimento de mercado e o desenvolvimento tecnológico tem tornado a fonte eólica uma opção imprescindível, de presente e futuro para o fornecimento de energia limpa em grande escala (TOLMASQUIM, 2003).

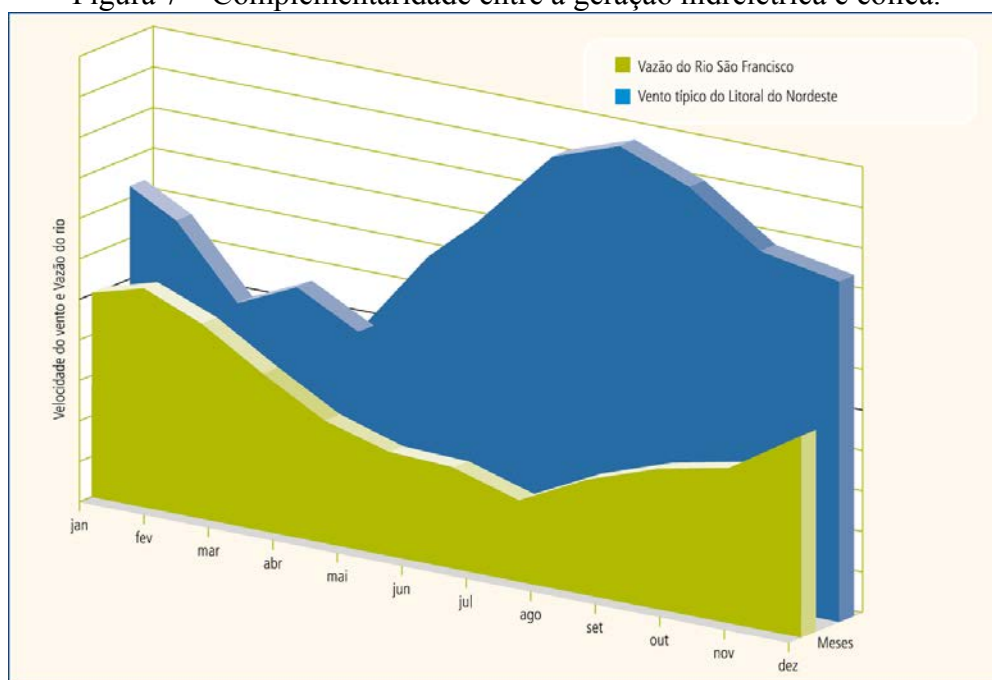
A partir do início do século XXI, as questões ambientais tornaram ainda mais significativos os aspectos que fazem da energia eólica uma das mais promissoras fontes de energia elétrica. A energia eólica apresenta vantagens como, por exemplo, não utilizar água como elemento motriz nem fluido de refrigeração; quase toda a área usada em um parque eólico pode ser utilizada para outros fins, como a pecuária e atividades agrícolas; não alterar as características físico-químicas do solo; baixa emissão de gases poluentes, dentre eles o CO₂ (BOSSANYI et al., 2001).

O mais importante benefício que a energia eólica oferece ao meio ambiente está no fato de que ela não emite poluentes durante sua operação. Gerar energia elétrica sem qualquer processo de combustão ou etapa de transformação térmica constitui um procedimento favorável ao meio ambiente, por ser limpo e sem contaminação. Sua utilização em escala minimiza os impactos originados pelos combustíveis fósseis durante a sua extração, transformação, transporte e combustão (ALDABÓ, 2002).

A utilização da energia eólica para geração de eletricidade apresenta incidência nula sobre as características físico-químicas do solo, pois não produz contaminantes para o meio nem necessita de grandes movimentos de terras (MONTEZANO, 2012).

Notadamente no Brasil, que tem sua base de geração de energia no sistema hidráulico, a geração eólica apresenta uma fonte de energia alternativa complementar à energia hidrelétrica. Como pode ser observado na Figura 7, o período de ventos mais fortes no Nordeste (principal polo de energia eólica no Brasil) coincide com os períodos de escassez de chuvas; e durante os meses com ventos mais amenos ocorrem mais chuvas. Assim, quando há vento pode-se estocar água no reservatório, quando há menos vento pode-se usar a água estocada para gerar energia elétrica.

Figura 7 – Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica.



Fonte: (ANEEL, 2016a).

O aproveitamento dos ventos para geração de energia elétrica apresenta, como toda tecnologia de produção de energia, algumas características ambientais desfavoráveis, como o impacto visual, ruído audível, interferência eletromagnética, ofuscamento e danos à fauna, ainda que em pequena escala. Essas características podem ser significativamente minoradas, e até mesmo eliminadas, através de planejamento adequado e também no uso de inovações tecnológicas (TOLMASQUIM, 2003).

A instalação de um sistema eólico apresenta, em algumas áreas, conflitos com a preservação da paisagem. Entretanto, a reação da população quanto ao impacto visual vem

sendo minimizada, principalmente, pela conscientização sobre a importância ecológica da geração eólica.

Os geradores eólicos produzem ruído (especialmente as pás) que aumenta proporcionalmente com a velocidade do vento (ALDABÓ, 2002). O ruído proveniente das turbinas eólicas tem origem mecânica e aerodinâmica. O ruído mecânico é proveniente, principalmente, da caixa de engrenagens, da nacela e da junção da torre com a nacela. O ruído aerodinâmico é influenciado diretamente pela velocidade do vento incidente sobre a turbina eólica (TOLMASQUIM, 2003). As turbinas modernas produzem bem menos ruído do que as turbinas convencionais.

O impacto de turbinas eólicas sobre a fauna preocupa os ecologistas e está relacionado com acidentes eventuais envolvendo pássaros quando estes se chocam nas pás em movimento. Deve-se evitar a instalação de grandes parques eólicos em locais onde reconhecidamente coincida com rotas migratórias de pássaros (MONTEZANO, 2012).

1.6 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é estudar a viabilidade da instalação de um sistema de microgeração de eletricidade utilizando energia eólica na cidade de Guaratinguetá. Para isso, é utilizado o aerogerador Air Silent X da Primus Wind Power com uma hélice de PVC.

O trabalho mostra o desenvolvimento de um medidor de energia DC utilizando arduino para coletar a quantidade de energia gerada e, a partir disso, ser possível analisar os custos envolvidos na instalação e manutenção do sistema eólico instalado, além do tempo de retorno do investimento.

Este trabalho tem como principal objetivo salientar as vantagens e desvantagens da energia eólica.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de graduação é constituído por cinco capítulos.

O segundo capítulo abrange conceitos relacionados à geração de eletricidade a partir da energia eólica. Para isso, ele descreve os mecanismos de formação dos ventos e mostra os diferentes tipos de aerogeradores, que tem seu funcionamento explicado. Por fim, disserta-se sobre os tipos de sistemas eólicos.

O terceiro capítulo apresenta como foi feita a montagem do experimento, bem como os equipamentos utilizados, através de esquemas e fotos. Em seguida, descreve-se o procedimento realizado para a obtenção dos resultados.

O quarto capítulo é constituído de cálculos realizados a partir de dados da literatura e dos dados obtidos no experimento, para fins de comparação. A partir disso, são feitas as devidas análises para atingir o objetivo.

No quinto capítulo apresenta-se a conclusão, formada pela síntese de todo o conteúdo elucidado nos capítulos anteriores, desde a análise inicial até a conquista do objetivo. São indicadas ainda sugestões de propostas para trabalhos futuros.

2 PARTE TEÓRICA

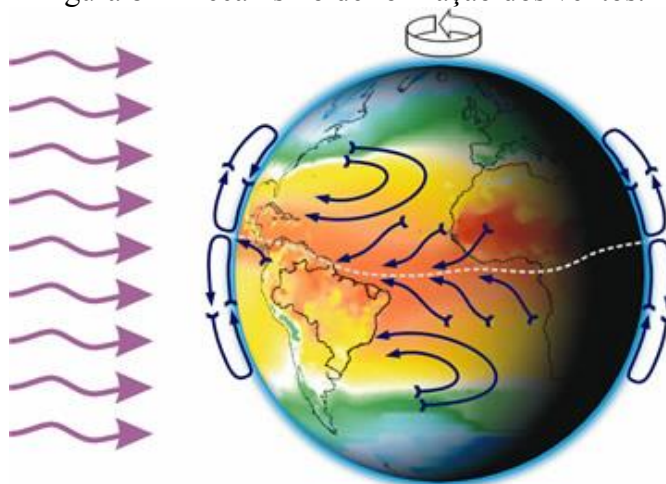
2.1 PROCESSO DE FORMAÇÃO DOS VENTOS

A energia é definida como a quantidade de trabalho que um sistema físico é capaz de realizar. A energia não pode ser criada, nem consumida ou destruída, mas ela pode ser convertida ou transferida para outras formas: a energia cinética do movimento das moléculas do ar pode ser convertida em energia de movimento pelo rotor de uma turbina eólica, que por sua vez pode ser convertida em energia elétrica por um gerador acoplado à turbina. Em cada conversão a energia original é convertida em energia calorífica (ALDABÓ, 2002).

Os ventos são criados a partir do aquecimento desigual da atmosfera causado pela orientação dos raios solares e pelo movimento da Terra. Regiões próximas da linha do Equador, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, têm sua atmosfera mais aquecida do que as regiões polares. Com isso, o ar quente, menos denso nas baixas altitudes, tende a subir. Ele é substituído pelo ar frio, mais denso, que vem dos polos da Terra. O deslocamento de ar ilustrado na Figura 8 é o mecanismo responsável pela formação dos ventos (BOSSANYI et al., 2001).

Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que aproximadamente 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centenas de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (DUTRA, 2008).

Figura 8 – Mecanismo de formação dos ventos.



Fonte: (DUTRA, 2008).

O vento é influenciado pela rotação da Terra, provocando variações sazonais na sua intensidade e direção, e pela topografia do local (ALDABÓ, 2002). A variação do vento sofre influência devido às diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol, inerentes a cada tipo de superfície. Durante o dia, a terra tem maior capacidade de refletir os raios solares que o mar, conseqüentemente a temperatura do ar na terra aumenta e uma corrente de ar sopra do mar para a terra (brisa marítima). Durante a noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar.

Além disso, a direção dos ventos também muda de acordo com o relevo da região, como nos vales e montanhas, por exemplo. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha sobe e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. À noite, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida (SILVA, 1999).

Nos projetos de instalação de aerogeradores, devido às peculiaridades do vento em cada região, a avaliação do local deve levar em consideração os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento (BOSSANYI et al., 2001).

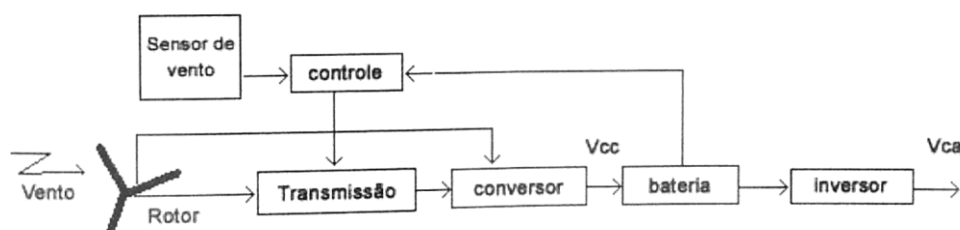
2.2 AEROGERADORES

O aerogerador é uma máquina que transforma a energia mecânica, a partir da energia do vento, em energia elétrica (ALDABÓ, 2002).

O rendimento global de um sistema eólico é a relação entre a energia que é entregue pelo sistema à rede, em condições de total despacho, e a energia bruta disponível no vento que atravessa a área do rotor. Uma turbina eólica tem o seu rendimento máximo a uma dada velocidade do vento, chamada de velocidade nominal (TOLMASQUIM, 2003).

Os principais componentes de um sistema eólico autônomo são a turbina (ou rotor), transmissão, controle, conversor e sistema de armazenamento, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de bloco de um sistema eólico.



Fonte: (ALDABÓ, 2002).

O conjunto aerogerador é constituído pelo rotor, hélices, transmissão e conversor de energia mecânica em elétrica (gerador). O rotor capta a energia cinética dos ventos e a converte em energia mecânica no eixo, e pode ter eixo horizontal (tais como rotor hélice, pás múltiplas e holandês) ou eixo vertical (tais como rotor Savonius e Darrieus) (ALDABÓ, 2002).

2.2.1 Rotores de eixo vertical

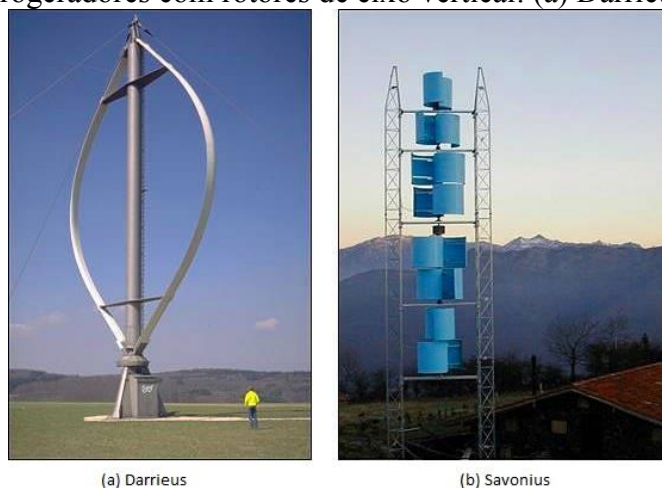
Em geral, os rotores de eixo vertical tem a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devido às forças de Coriolis. Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação (*lift*) e por forças de arrasto (*drag*). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus, Savonius e turbinas com torre de vórtices (DUTRA, 2008).

O rotor Darrieus baseia-se no princípio da variação cíclica de incidência. Eles constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao eixo vertical movido por forças de sustentação.

O rotor Savonius baseia-se no princípio do acionamento diferencial. Os esforços exercidos pelo vento em cada uma das faces do corpo oco são de intensidades diferentes, que resulta um binário responsável pelo movimento rotativo do conjunto.

A Figura 10 mostra os dois tipos de aerogeradores com rotor de eixo vertical explicados.

Figura 10 – Aerogeradores com rotores de eixo vertical: (a) Darrieus; (b) Savonius.



(a) Darrieus

(b) Savonius

Fonte: (DELTA VOLT, 2016).

2.2.2 Rotores de eixo horizontal

Os rotores de eixo horizontal são os tipos mais comuns de aerogeradores. Na geração de energia elétrica, são mais utilizados os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de três pás ou em alguns casos (velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico) de uma ou duas pás.

Os rotores de eixo horizontal são movidos por forças aerodinâmicas, proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento, que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação ou *lift*) e na direção do escoamento (forças de arrasto ou *drag*). As forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo (ângulo de ataque) (DUTRA, 2008).

Sob uma mesma velocidade de vento, os rotores que giram sob efeito de forças de arrasto (*drag*) possuem menos potência que aqueles que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação (*lift*) (BOSSANYI et al., 2001).

Os rotores de eixo horizontal ao longo do vento (aerogeradores convencionais) são predominantemente movidos por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás. As pás podem ter formas diferentes e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada (DUTRA, 2008).

Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (*down wind*) ou a montante do vento (*up wind*). No primeiro caso, a sombra da torre provoca vibrações nas pás. No segundo caso, a sombra das pás provoca esforços vibratórios na torre. Sistemas a montante do vento necessitam de mecanismos de orientação do rotor com o fluxo de vento, enquanto nos sistemas a jusante do vento, a orientação realiza-se automaticamente (DUTRA, 2008).

A Figura 11 ilustra alguns exemplos de aerogeradores com rotor de eixo horizontal instalados em diferentes lugares.

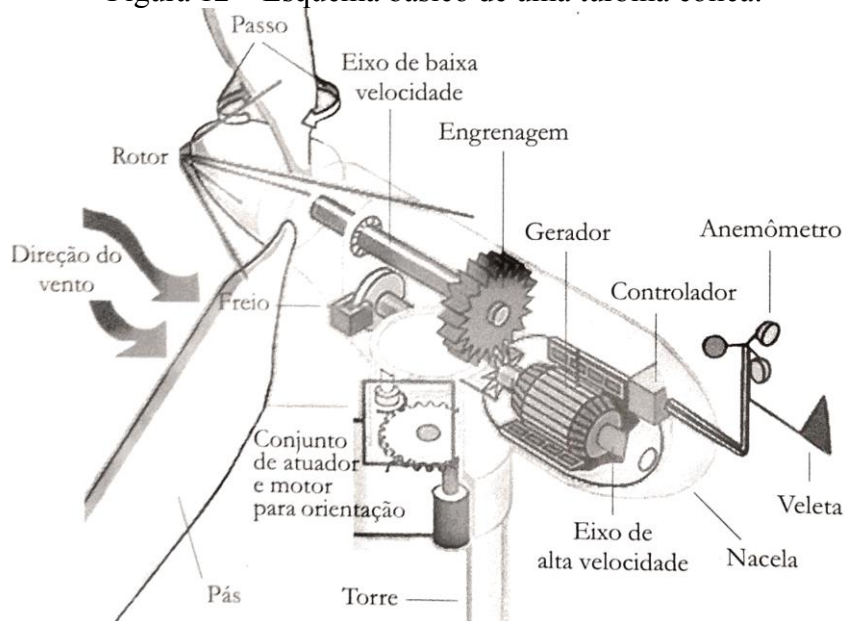
Figura 11 – Aerogeradores com rotores de eixo horizontal.



Fonte: (ANEEL, 2016a).

Os aerogeradores são diferenciados pelo tipo utilizado (convencional ou multipolos), pelo seu tamanho, pela presença ou não de uma caixa multiplicadora e pelo formato da nacela (ou nacela). Os principais componentes do aerogerador são a torre, a nacela e o rotor. A Figura 12 ilustra um aerogerador de eixo horizontal com seus componentes.

Figura 12 – Esquema básico de uma turbina eólica.



Fonte: (ALDABÓ, 2002).

O rotor é o componente responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica através da rotação do eixo (TOLMASQUIM, 2003).

A nacela (ou nacela) é o compartimento (estrutura de proteção) montada sobre a torre onde se situam a engrenagem, eixos de baixa e alta velocidade, gerador, controlador e freio, ou seja, todo o mecanismo do aerogerador (ALDABÓ, 2002).

O gerador elétrico é responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica (TOLMASQUIM, 2003). Os geradores podem ser de corrente contínua, síncronos, assíncronos ou de comutador de corrente alternada e o tipo a ser empregado no projeto deve ser cuidadosamente analisado, pois cada um possui vantagens e desvantagens (DUTRA, 2008).

A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, é responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor ao gerador (TOLMASQUIM, 2003). A caixa de transmissão mecânica é composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos colocados entre o rotor e o gerador de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor (20 a 150 rpm) à velocidade de rotação mais elevada do gerador (1200 a 1800 rpm) (BOSSANYI et al., 2001). Alguns aerogeradores não possuem caixa multiplicadora. Neste caso, o eixo do rotor eólico está acoplado diretamente ao eixo do gerador (DUTRA, 2008).

O mecanismo de controle é responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade e controle da carga. Este mecanismo será apresentado de forma mais detalhada na seção 2.2.3 deste trabalho.

As pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Inicialmente fabricadas em alumínio, atualmente são fabricadas em fibras de vidro reforçadas com epoxi. As pás são fixadas através de flanges em uma estrutura metálica à frente do aerogerador denominada cubo. Esta estrutura é construída em aço ou liga de alta resistência. O eixo é construído em aço ou liga metálica de alta resistência e é o responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador (DUTRA, 2008).

A torre é responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente. Podem ser de metal treliçado, de metal tubular ou de concreto. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo do sistema (DUTRA, 2008).

2.2.3 Mecanismo de controle de aerogeradores

Devido à variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga) (DUTRA, 2008).

A quantidade de potência extraída do vento e entregue ao aerogerador pode ser controlada através de dois tipos de controle aerodinâmico: controle estol (*stall*) e controle de

passo (*pitch*). Sistemas com controle de passo vêm sendo cada vez mais utilizados, pois oferecem maior flexibilidade (BOSSANYI et al., 2001).

A maioria dos aerogeradores utiliza o controle estol para simplificar o sistema. O controle estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento e necessita que a velocidade do rotor seja sempre constante. Geralmente, a velocidade do rotor é dada pelo gerador de indução diretamente acoplado à rede. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal (DUTRA, 2008).

Para velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá (estol), reduzindo as forças de sustentação, aumentando as forças de arrasto e a potência do rotor. Para evitar que o efeito estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal (DUTRA, 2008).

Os aerogeradores com controle estol possuem algumas vantagens em relação aos com controle de passo (DUTRA, 2008):

- maior simplicidade, pois não necessita de sistema de controle de passo;
- estrutura de cubo do rotor simples;
- menor manutenção devido a um número menor de peças móveis;
- auto-confiabilidade do controle de potência.

O controle de passo é um sistema ativo que é acionado através de um circuito hidráulico e normalmente necessita de uma informação vinda do sistema de controle. Neste tipo de controle, o controlador verifica a potência de saída várias vezes por segundo. Quando a potência está muito alta, ele envia um comando para o mecanismo de passo, que gira automaticamente as pás da turbina reduzindo o ângulo de ataque e diminuindo a área superficial contra a direção do vento. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento. Se a intensidade do vento diminui, o mecanismo aciona a hélice para que ela apresente maior área superficial contra a direção do vento (ALDABÓ, 2002).

As pás do rotor em aerogeradores com controle de passo são mais sofisticadas do que as controladas por estol, porque necessitam de um sistema de variação de passo. Por outro lado, as pás do rotor com controle de passo possuem certas vantagens, como (DUTRA, 2008):

- maior produção de energia sob as mesmas condições;
- partida simples do rotor pela mudança do passo;
- controle de potência sob quaisquer condições de vento;

- para cargas pequenas, as pás do rotor entram em posição de embandeiramento sob ventos extremos;
- alcançam a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas);
- freios fortes;
- pás mais leves.

Uma mistura de controle por estol e de passo é denominado *estol ativo*. Neste caso, o passo da pá do rotor é girado na direção do estol e não na direção da posição de embandeiramento (menor sustentação) como é feito em um sistema de passo normal. As vantagens deste sistema são (DUTRA, 2008):

- são necessárias pequeníssimas mudanças no ângulo do passo;
- possibilidade de controle da potência sob condições de potência parcial (ventos baixos);
- a posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em situação de ventos extremos.

As principais funções do controlador de carga são: bloquear a corrente reversa e prevenir a sobrecarga de baterias (ALDABÓ, 2002).

Quando não há vento, o sistema pode consumir uma pequena corrente, com fluxo reverso, descarregando a bateria. Para evitar isso, o controlador de carga admite o fluxo de corrente numa única direção. Em alguns modelos, a corrente passa através de um transistor que age como uma válvula de controle. O bloqueio também pode ser feito através de relés na saída ou simplesmente um diodo para pequenas aplicações.

Ao atingir a carga plena, a bateria não pode mais armazenar energia. Quando a aplicação de carga continuar, a bateria sofre um sobreaquecimento e, conseqüentemente, intensa degradação. A prevenção de sobrecarga é feita pela redução do fluxo de energia para bateria, a partir do instante em que ela atinge uma determinada tensão. Quando a tensão diminui, por utilização da energia armazenada ou diminuição da intensidade do vento, o controlador de carga admite a carga máxima novamente. Esse processo é chamado de regulação de tensão e é a função essencial de um controlador de carga.

A maioria dos controladores de carga realiza a regulação de tensão pela variação da largura dos pulsos CC enviados para as baterias. Esse processo é denominado de modulação por largura de pulsos, PWM (*Pulse Width Modulation*), onde a maior largura do pulso equivale a uma quantidade maior de energia para as baterias (ALDABÓ, 2002).

Outro tipo de controlador, o tipo *shunt*, desvia o excesso de energia para uma carga paralela (*shunt*). A aplicação de carga *shunt* mais utilizada é o aquecedor elétrico de água. Este tipo de controlador encontra maior aplicação em sistemas eólicos que não podem operar em circuito aberto (ALDABÓ, 2002).

Além das funções citadas acima, o controlador de carga também possui algumas outras (ALDABÓ, 2002):

- proteção de sobrecarga elétrica;
- prevenir o excesso de descarga;
- sinalizar o estado da bateria e fluxo de carga;
- alguns controladores possuem compensação de temperatura;
- alguns controladores possuem dispositivo para seleção do tipo de bateria;
- alguns controladores possuem circuito de proteção de sobrecarga.

2.3 CONCEITOS DA ENERGIA EÓLICA

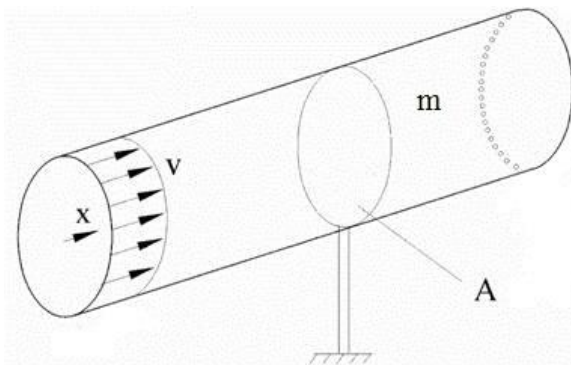
Como apresentado na seção 2.1, a disponibilidade de energia eólica depende da hora, dia, estação do ano, e de outros fatores climáticos e geográficos.

De modo geral, o deslocamento de massa de ar m , ou seja, vento com velocidade v é dotado de energia cinética E_c , dada pela equação (1):

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

Pode-se considerar a mesma massa de ar m em movimento na direção x com velocidade v , perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário, ilustrado na Figura 13:

Figura 13 – Fluxo de ar através de uma área transversal A.



Fonte: (DUTRA, 2008).

A massa de ar que passa pela seção A de um cilindro, transversal ao fluxo de ar, é dada pela equação (2):

$$m = A \cdot \rho \cdot v \quad (2)$$

Sendo:

m : massa de ar em movimento [kg]

A : área da seção transversal em [m²]

ρ : massa específica do ar em [kg/m³]

v : velocidade do vento em [m/s]

Substituindo a equação (2) na equação (1), tem-se que a potência disponível no vento P é dada pela equação (3):

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

Segundo Aldabó (2002), em termos práticos, para sistemas com altura até 150 m, a potência eólica aumenta conforme a altura acima do nível do terreno. A velocidade do vento muda conforme a equação (4):

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (4)$$

v : velocidade do vento na altura desejada em [m/s];

v_0 : velocidade do vento disponível na altura conhecida em [m/s];

h : altura desejada em [m];

h_0 : altura conhecida em [m];

n : fator de rugosidade do terreno (vide Tabela 4).

Tabela 4 – Fator de rugosidade do terreno.

Descrição do terreno	Fator de rugosidade (n)
Terreno sem vegetação	0,10
Terreno gramado	0,12
Terreno cultivado	0,19
Terreno com poucas árvores	0,23
Terreno com muitas árvores	0,26
Florestas	0,28
Zonas urbanas sem edifícios altos	0,32

Fonte: ALDABÓ (2002).

A equação (3) pode ser reescrita por unidade de área, definindo, assim, o fluxo de potência DP descrita pela equação (5):

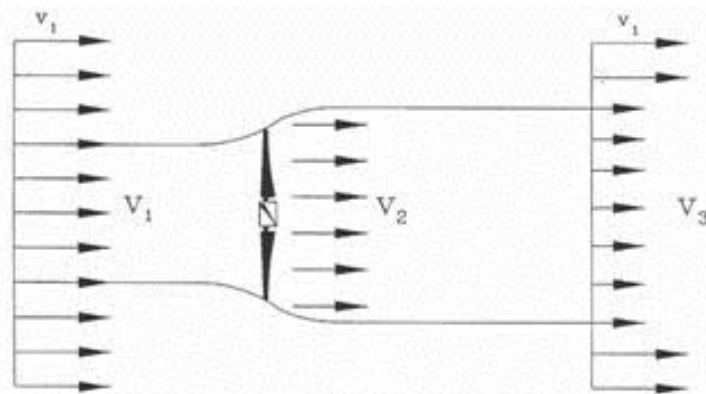
$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (5)$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência total disponível no vento não é totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia elétrica. Para levar em conta esta característica física, a equação (6) introduz um índice denominado coeficiente de potência c_p , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível captada pela pá P_d que é realmente aproveitada no eixo do rotor P_{ex} (DUTRA, 2008).

$$c_p = \frac{P_{ex}}{P_d} \quad (6)$$

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento (quando o c_p é máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo com velocidade do vento na região anterior às pás v_1 , velocidade do vento no nível das pás v_2 e velocidade do vento após deixar as pás v_3 , conforme apresentado na Figura 14 (DUTRA, 2008).

Figura 14 – Perda de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.



Fonte: (DUTRA, 2008).

Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar. Pela lei da continuidade expressa na equação (7), tem-se que:

$$\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 = \rho \cdot v_3 \cdot A_3 \quad (7)$$

Como a redução da pressão do ar é mínima, a densidade do ar pode ser considerada constante (DUTRA, 2008). A energia cinética extraída E_{ex} pelo aerogerador é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás, como mostrado na equação (8):

$$E_{ex} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (8)$$

Substituindo a equação (2) na equação (8) tem-se que a potência extraída do vento no rotor P_{ex} é dada pela equação (9).

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_2 \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (9)$$

Neste ponto é necessário fazer duas considerações sobre a relação entre as velocidades v_1 e v_3 (DUTRA, 2008):

- Quando a velocidade do vento se mantém constante ($v_1 = v_3$) nenhuma potência é extraída ($E_{ex} = 0$);
- Quando a velocidade do vento após as pás é nula ($v_3 = 0$) o fluxo de massa de ar é zero, o que significa também que nenhuma potência é retirada ($E_{ex} = 0$).

Pelo teorema de Rankine-Froude, pode-se assumir que a relação entre as velocidades v_1 , v_2 e v_3 é dada pela equação (10):

$$v_2 = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_3) \quad (10)$$

Substituindo a equação (10) na equação (9), obtem-se a equação (11).

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_3) \right] \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (11)$$

A equação (11) pode ser reescrita na forma da equação (12).

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

Mas a potência disponível no vento aproveitada pela pá é conhecida e dada pela equação (13):

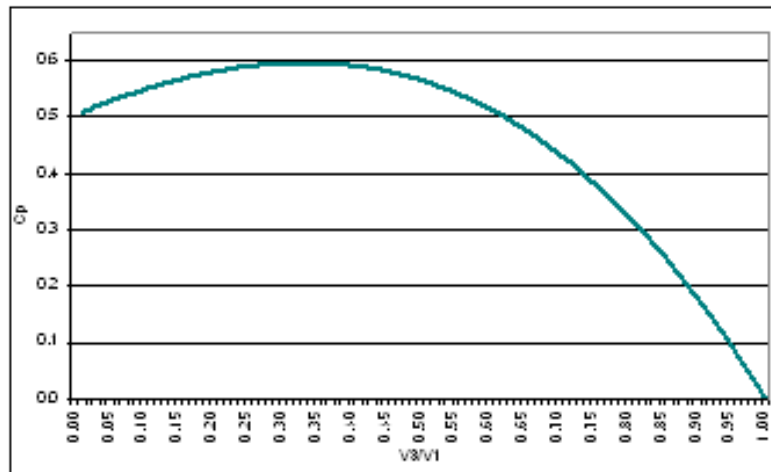
$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (13)$$

Assim, pela definição expressa na equação (6) e comparando-a, juntamente com a equação (13), à equação (12), encontra-se o coeficiente de potência:

$$c_p = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Observando o gráfico da Figura 15, o valor máximo do coeficiente de potência c_p é 0,59 e ocorre quando $v_3/v_1 = 1/3$.

Figura 15 – Distribuição do coeficiente de potência c_p em função de v_3/v_1 .



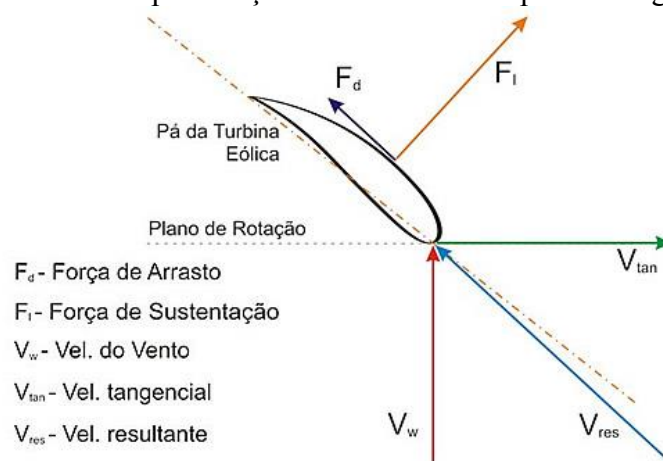
Fonte: (DUTRA, 2008).

A Figura 16 mostra as principais forças atuantes em uma pá do aerogerador, assim como os ângulos de ataque α e de passo β . A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante visto pela pá \vec{V}_{res} , resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente \vec{V}_w com a velocidade tangencial da pá do aerogerador \vec{V}_{tan} , conforme a equação (15) (DUTRA, 2008).

$$\vec{V}_{res} = \vec{V}_w - \vec{V}_{tan} \quad (15)$$

A força de arrasto é produzida na mesma direção de \vec{V}_{res} . A resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto na direção \vec{V}_{tan} produz o torque do aerogerador (DUTRA, 2008).

Figura 16 – Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador.



Fonte: (DUTRA, 2008).

A potência mecânica extraída do vento pelo aerogerador depende de vários fatores. Tratando-se de estudos elétricos, o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pela equação (16) (DUTRA, 2008).

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_w^3 \cdot c_p(\lambda, \beta) \quad (16)$$

Sendo:

c_p : coeficiente de potência do aerogerador;

ρ : densidade do ar em $[\text{kg}/\text{m}^3]$;

A : área varrida pelo rotor do aerogerador em $[\text{m}^2]$;

λ : razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente;

O valor de λ na equação (16) pode ser calculado pela equação (17):

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_{wt}}{v_w} \quad (17)$$

Sendo:

R : raio do aerogerador em $[\text{m}]$;

ω_{wt} : velocidade angular da aerogerador em $[\text{rad}/\text{s}]$;

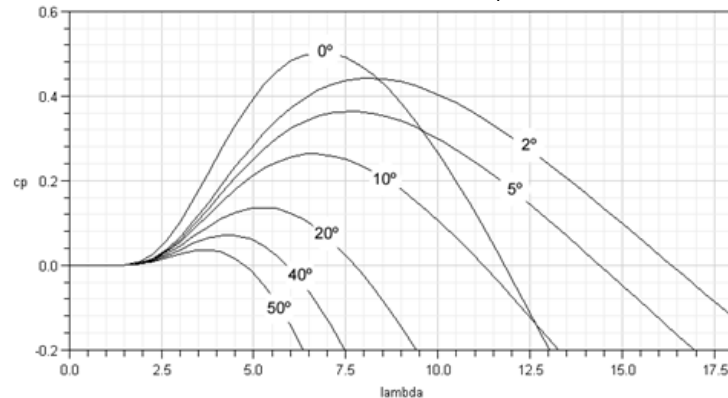
v_w : velocidade do vento incidente no aerogerador em $[\text{m}/\text{s}]$.

Na equação (16), o coeficiente de potência $c_p(\lambda, \beta)$ depende das características do aerogerador, sendo função da razão de velocidades λ e do ângulo de passo β das pás (*pitch*) do

aerogerador. O $c_p(\lambda, \beta)$ é expresso como uma característica bidimensional (BOSSANYI et al., 2001).

As aproximações numéricas normalmente são desenvolvidas para o cálculo de c_p para valores dados de λ e β . A Figura 17 mostra a característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçada para vários valores de β (BOSSANYI et al., 2001).

Figura 17 – Curvas características de c_p em função de λ e β .



Fonte: (DUTRA, 2008).

2.4 SISTEMAS EÓLICOS

Um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações, sendo sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados casos, conforme a aplicação, de uma unidade de armazenamento (TOLMASQUIM, 2003). A Figura 18 ilustra aerogeradores com potências diferentes usados nas mais diversas aplicações de sistemas eólicos.

Figura 18 – Tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações.



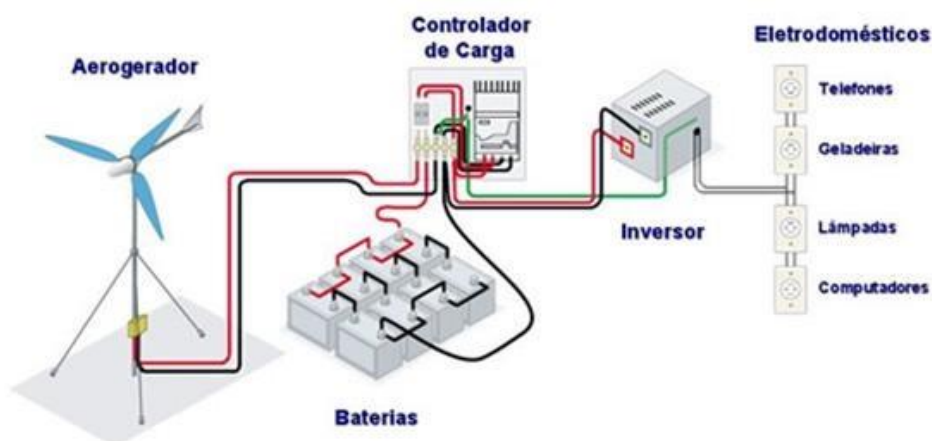
Fonte: (DUTRA, 2008).

2.4.1 Sistemas Isolados

Os sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos, ou na forma de energia potencial gravitacional, com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação, nos quais toda a água bombeada é diretamente consumida (DUTRA, 2008).

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 não permitir que haja danos ao sistema de baterias por sobrecargas ou descargas profundas. Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessária a utilização de um inversor. O inversor utilizado é de estado sólido (eletrônico) (TOLMASQUIM, 2003). A Figura 19 mostra um exemplo de ligação de um aerogerador na configuração de um sistema eólico isolado.

Figura 19 – Configuração de um sistema eólico isolado.



Fonte: (DUTRA, 2008).

2.4.2 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são aqueles que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel e módulos fotovoltaicos. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é

necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário (DUTRA, 2008).

Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio porte destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso (TOLMASQUIM, 2003). A Figura 20 mostra um exemplo de ligação de um sistema híbrido.

Figura 20 – Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.



Fonte: (DUTRA, 2008).

2.4.3 Sistemas Interligados à rede

Os sistemas interligados à rede utilizam um grande número de aerogeradores e não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. Estes sistemas representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão interligados. Os sistemas eólicos interligados à rede apresentam as vantagens inerentes aos sistemas de geração distribuídas, tais como: a redução de perdas, menor custo de expansão de rede e a geração na hora de ponta quando o regime de ventos coincide com o pico da curva de carga (TOLMASQUIM, 2003).

A foto da Figura 21 mostra aerogeradores de um parque eólico conectado à rede no estado do Ceará.

Figura 21 – Parque eólico conectado à rede: Parque Eólico da Prainha – CE.



Fonte: (DUTRA, 2008).

2.4.4 Sistemas *Offshore*

As instalações *offshore* representam a nova fronteira da utilização da energia eólica. Embora representem instalações de maior custo de transporte, instalação e manutenção, as instalações *offshore* têm crescido a cada ano principalmente com o esgotamento de áreas de grande potencial eólico em terra. A indústria eólica tem investido no desenvolvimento tecnológico da adaptação das turbinas eólicas convencionais para uso no mar. Além do desenvolvimento tecnológico, os projetos *offshore* necessitam de estratégias especiais quanto ao tipo de transporte das máquinas, sua instalação e operação (DUTRA, 2008).

As vantagens da geração de energia eólica *offshore* são (ALDABÓ, 2002):

- disponibilidade de grandes áreas abertas, propícias para projetos de porte;
- altas velocidades do vento, que geralmente aumenta com a distância da costa;
- menor turbulência do vento, o que possibilita turbinas com maior eficiência e menor carga de fadiga;
- menor altura das torres, já que o vento atua na camada superficial da água.

As suas desvantagens são (ALDABÓ, 2002):

- custo adicional em função das fundações marinhas;
- custo adicional para a integração com a rede elétrica (transmissão de energia);
- acesso limitado para operação e manutenção.

A foto da Figura 22 mostra aerogeradores de um parque eólico instalado no Mar do Norte.

Figura 22 – Parque eólico instalado no Mar do Norte.



Fonte: (DUTRA, 2008).

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 MONTAGEM DO EXPERIMENTO E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A pesquisa foi realizada no Centro de Energias Renováveis da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Guaratinguetá. A cidade apresenta uma latitude de 22°48' Sul e longitude de 45°11' Oeste.

O aerogerador utilizado no experimento foi o Air Silent X fabricado pela empresa americana Primus Wind Power. Este foi instalado em uma torre a uma altura de 8,5 m. A hélice original do aerogerador foi trocada por uma hélice de PVC.

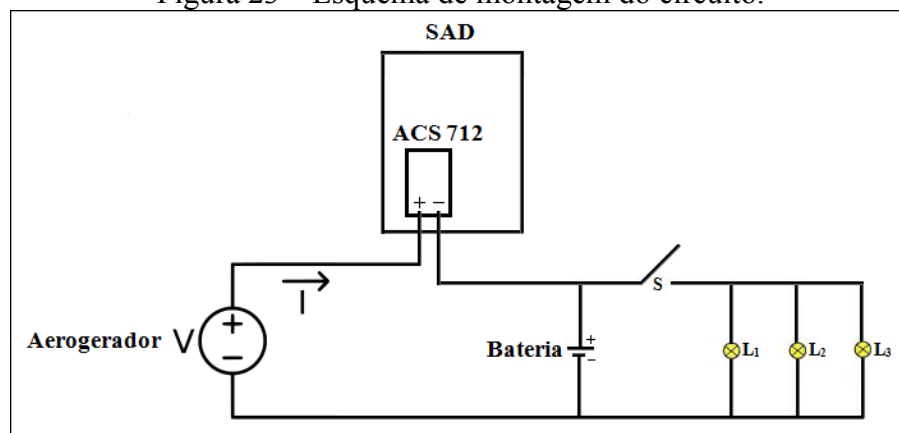
O aerogerador foi ligado em uma bateria de chumbo selada, recarregável, com tensão nominal 12 V e capacidade 7 Ah através de um cabo trifilar de cobre com seção 4 mm² e comprimento 12 m.

Entre o aerogerador e a bateria, foi instalado um Sistema de Aquisição de Dados (SAD) utilizando a plataforma Arduino UNO conectado ao sensor de corrente ACS712 30A e um display LCD JHD162A.

Como carga teste foram utilizadas três lâmpadas de LED ligadas em paralelo com tensão nominal 12 V e potência nominal 1 W cada.

A Figura 23 mostra um esquema do circuito montado para a realização dos experimentos.

Figura 23 – Esquema de montagem do circuito.



Fonte: Autor.

O método consistiu na medição da tensão da bateria V_{bat} no período de 16 nov. 2016 a 24 nov. 2016 às 17h00min. Para isso foi utilizado um voltímetro digital. Se a tensão V_{bat}

medida fosse menor que o valor de ajuste da regulação da tensão do aerogerador (15,0 V), a carga teste deveria ser desconectada do circuito. Caso contrário, a carga teste deveria ser conectada à bateria até que a tensão V_{bat} atingisse novamente 11,5 V.

A Figura 24 mostra uma foto real de como o circuito foi montado para os experimentos.

Figura 24 – Foto de montagem do circuito.



Fonte: Autor.

Para a medição da tensão entre os terminais da bateria em aberto e com carga utilizou-se o multímetro digital Sunwa DT – 830B. A Figura 25 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 25 – Multímetro digital Sunwa DT – 830B.

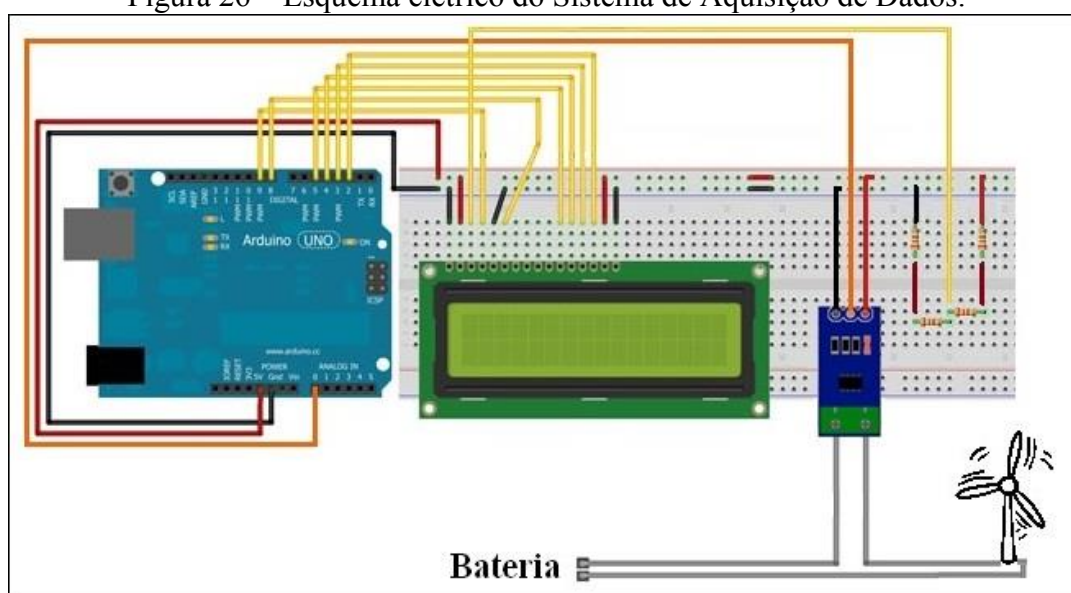


Fonte: Autor.

3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SAD)

Para o SAD foi utilizada a plataforma Arduino UNO. A porta I/O analógica *A0* do Arduino foi conectada ao sensor de corrente ACS712 30A para leitura de dados. O Arduino também foi conectado a um display de cristal líquido modelo LCD JHD162A. O esquema elétrico é mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Esquema elétrico do Sistema de Aquisição de Dados.



Fonte: Autor.

O Arduino é um pequeno computador que pode ser programado para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. O Arduino é o que se chama de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software (McROBERTS, 2011).

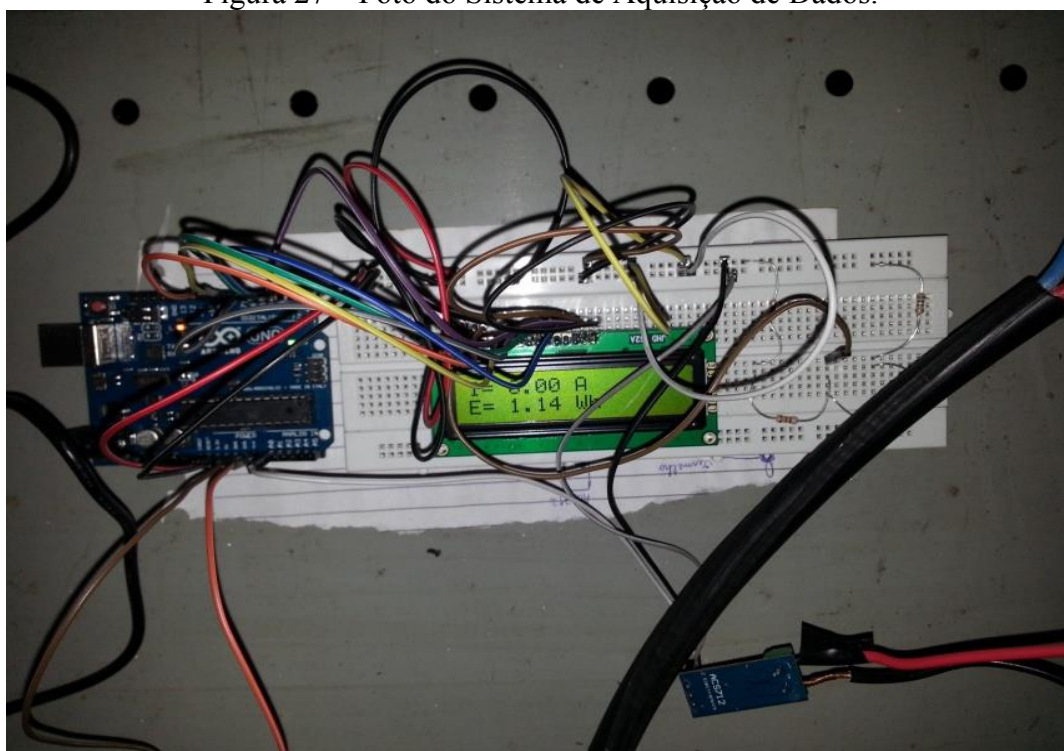
O ACS712 é um sensor de corrente que usa o Efeito Hall para detectar o campo magnético gerado pela passagem de corrente, gerando uma tensão proporcional de 66 mV/A na saída. Este sensor possui os bornes de ligação completamente isolados da saída para o Arduino e pode ser utilizado tanto para corrente alternada (AC) como para corrente contínua (DC).

O programa do Arduino utiliza o método de amostragem para o cálculo da energia gerada pelo aerogerador. Durante a execução do programa, a cada dois segundos, a porta *A0* do Arduino lê a tensão enviada pelo sensor de corrente. Na sequência, o programa calcula a corrente I , usando a taxa de conversão de 66 mV/A do ACS712. Utilizando a corrente obtida

anteriormente, o programa calcula a potência instantânea P_{inst} pela fórmula $P_{inst} = V \cdot I$, valendo-se de um valor fixo para V , que é dado pela tensão do aerogerador (12 V). Por fim, o programa calcula a energia E através da fórmula $E = P_{inst} \cdot t$, utilizando uma base de tempo de dois segundos ($t = 2$ s). A cada dois segundos, a leitura ocorre novamente e a energia calculada é somada ao valor da energia anterior. Portanto, a energia que é mostrada no display LCD é a energia gerada, acumulada ao longo da medição.

A Figura 27 é uma foto do SAD em funcionamento alguns minutos após ter sido ligado.

Figura 27 – Foto do Sistema de Aquisição de Dados.



Fonte: Autor.

3.3 AEROGERADOR AIR SILENT X

O aerogerador Air Silent X tem o rotor de eixo horizontal, não possui sistema de transmissão e utiliza controle estol. O controlador de carga original do aerogerador faz com que ele deva ter, como carga, uma bateria conectada a ele para gerar energia. Caso contrário, o gerador funciona como se estivesse em um circuito aberto e não há circulação de corrente, conseqüentemente não há geração de energia.

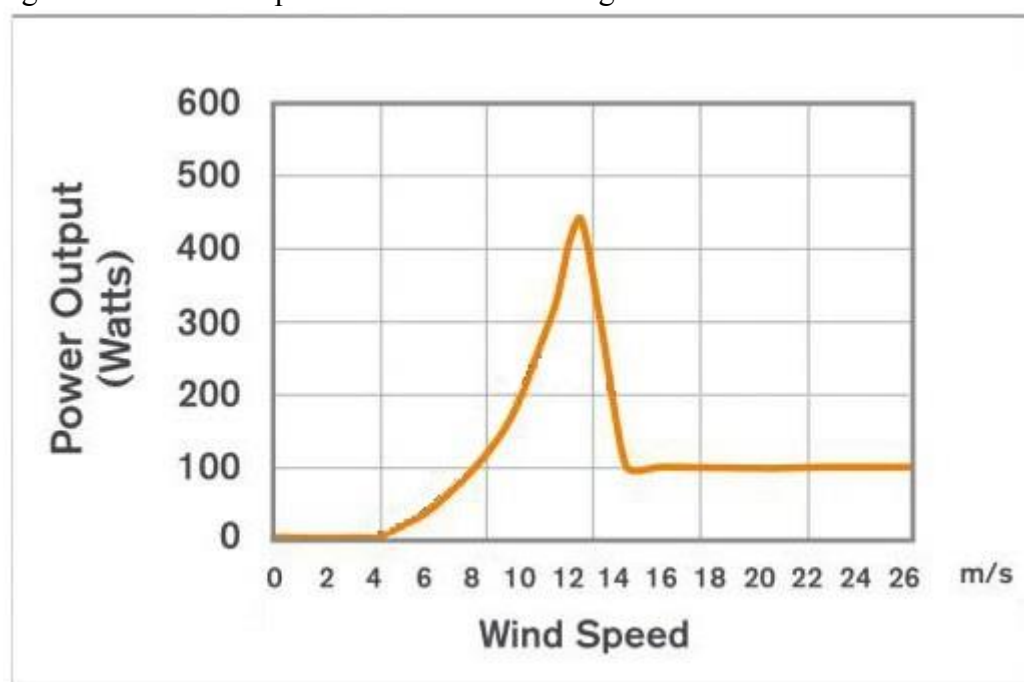
A Tabela 5 especifica as principais características do Air Silent X e a Figura 28 traz a curva de potência de saída do aerogerador a partir de uma dada velocidade de vento.

Tabela 5 – Especificações técnicas do aerogerador Air Silent X.

Parâmetro	Valores
Diâmetro do rotor	1,17 m
Peso	5,9 kg
Tensão nominal (V_{DC})	12 V
Tensão de ajuste (V_a)	Entre 13,6 e 17,0 V
Potência máxima ($P_{máx}$)	430 W
Vento para início de geração (v_g)	3,13 m/s
Vento limite	49,2 m/s
Produção de energia	90 Ah/dia a 5,5 m/s

Fonte: Adaptado de ENERGIA PURA (2016).

Figura 28 – Curva de potência de saída do aerogerador versus velocidade do vento.



Fonte: (ENERGIA PURA, 2016).

O controlador de carga do aerogerador monitora continuamente a tensão da bateria e compara-a com o valor de ajuste da regulação da tensão V_a . A tensão de ajuste do aerogerador é definida pelo usuário mediante ajuste de um potenciômetro na nacele do aerogerador.

O Air Silent X funciona basicamente em três modos principais, o carregamento de bateria, regulação e proteção contra velocidade excessiva.

Para que o aerogerador comece a funcionar no modo de carregamento, a bateria conectada a ele deve estar com uma tensão de no mínimo 10,5 V. Ele começa a carregar a bateria se a tensão entre os terminais dela for menor que a tensão de ajuste V_a definida pelo usuário no aerogerador e a velocidade do vento for maior que v_g . O aerogerador se mantém

neste estado até que a tensão entre os terminais da bateria seja igual à tensão de ajuste ou o vento seja menor que v_g (PRIMUS WIND POWER, 2013).

Quando a tensão entre os terminais da bateria é igual à V_a , o aerogerador começa a funcionar no modo de regulação, diminuindo a velocidade das pás de forma drástica e parando de carregar a bateria. O aerogerador permanece em regulação até a tensão da bateria descer abaixo do valor de referência (tensão de corte), que é ligeiramente inferior à tensão V_a . Em seguida, as pás voltarão a rodar em função do vento disponível. A diferença entre os dois valores é a *histerese* (PRIMUS WIND POWER, 2013).

Quando a velocidade do vento é superior a 22 m/s, o aerogerador entra no modo de proteção contra velocidade excessiva, fazendo com que as hélices girem lentamente. Então, o freio do aerogerador atua sobre as hélices, parando-as durante trinta segundos e, em seguida, deixando-as rodar. Se o vento ainda for superior a 22 m/s, o ciclo se repete (PRIMUS WIND POWER, 2013).

A foto da Figura 29 mostra o aerogerador com as pás de PVC que foi utilizado na realização dos experimentos.

Figura 29 – Foto do aerogerador utilizado.



Fonte: Autor.

3.4 MÉTODO

Para o estudo da energia gerada pelo aerogerador foi montado o circuito conforme Figura 23.

Primeiramente, considera-se que o intervalo da velocidade do vento entre 3,13 m/s e 4,00 m/s da curva da Figura 28 é uma reta.

Utilizando os valores de velocidade média trimestral do vento na equação da reta, pode-se encontrar a potência média teórica de saída do aerogerador, que é usada, posteriormente, no cálculo da energia mensal gerada pelo aerogerador.

Através da leitura realizada pelo SAD calcula-se a energia média gerada no mês de novembro. Em seguida, este valor é relacionado com o cálculo da energia gerada por mês (teórica) através de um parâmetro μ . Multiplicando o parâmetro μ pelos valores de energia média teórica gerada pelo aerogerador, é possível estimar a energia média para os demais meses do ano. Com isso, é possível definir os custos de energia economizada através da instalação do aerogerador e, levando-se em consideração os custos de montagem do projeto, verificar a viabilidade de implantação do sistema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como apresentado no capítulo 3, o levantamento de dados dos resultados do experimento foi feito de forma teórica e experimental. A seguir, são analisados os custos e benefícios de montagem e funcionamento do sistema de microgeração eólica.

4.1 CÁLCULOS DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Usando os valores de velocidade média trimestral do vento (Tabela 6) retirados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, que tem resolução horizontal de 1 km x 1 km, nas coordenadas 22° 48' Sul e 45°11' Oeste, calcula-se a energia gerada por mês pelo aerogerador Air Silent X.

Tabela 6 – Velocidade média sazonal de vento a 50 metros de altura (m/s).

Período (mês)	Velocidade média do vento (m/s)
Dez. – Fev.	2,94
Mar. – Maio	3,31
Jun. – Ago.	3,92
Set. – Nov.	3,51

Fonte: Adaptado de AMARANTE et al. (2001).

Em princípio, considera-se que o intervalo da velocidade do vento entre 3,13 m/s e 5,5 m/s da curva da Figura 28 é uma reta.

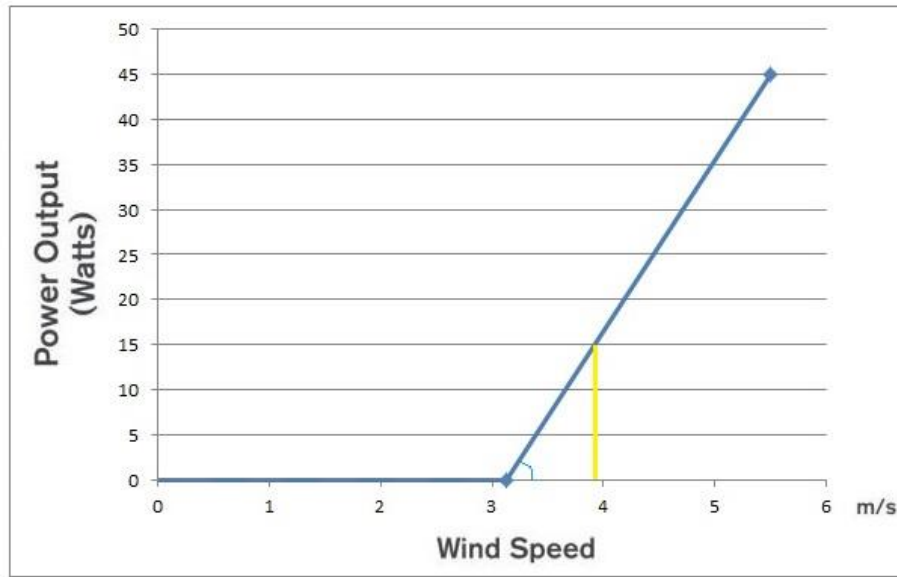
Segundo a Tabela 5, verifica-se que para vento com velocidade $v = 3,13$ m/s, a potência de saída do Air Silent X é $P = 0$ W. Para vento com velocidade $v = 5,5$ m/s, o Air Silent X gera uma energia de $E = 90$ Ah/dia. Logo, a energia E e a potência P são dadas pela equação (18) e equação (19), respectivamente:

$$E = [90 \text{ Ah/dia}] \cdot [12 \text{ V}] = 1080 \text{ Wh/dia} \quad (18)$$

$$P = \frac{[1080 \text{ Wh}]}{[24 \text{ h}]} = 45 \text{ W} \quad (19)$$

Com estes dados pode-se traçar a reta mostrada na Figura 30 e calcular seu coeficiente angular α através da equação (20).

Figura 30 – Aproximação do gráfico de potência do aerogerador para uma reta.



Fonte: Autor.

$$\alpha = \frac{(P_1 - P_0)}{(v_1 - v_0)} \quad (20)$$

Deve-se notar que essa aproximação para uma reta só é válida porque os valores de velocidade média do vento apresentados na Tabela 6 são menores que 4 m/s. Através dos pontos $(v; P)$ obtidos da Tabela 5 e da equação (20), obtém-se o valor de α dado pela equação (21):

$$(v_1; P_1) = (5,5; 45) \text{ e } (v_0; P_0) = (3,13; 0)$$

$$\alpha = \frac{(P_1 - P_0)}{(v_1 - v_0)} = \frac{45 - 0}{5,5 - 3,13} \therefore \alpha = 18,987 \quad (21)$$

Usando o ponto $(v_0; P_0) = (3,13; 0)$, a equação da reta da Figura 30 é dada pela equação (22):

$$P - P_0 = \alpha \cdot (v - v_0) \rightarrow P - 0 = 18,987 \cdot (v - 3,13)$$

$$\therefore P = 18,987 \cdot (v - 3,13) \quad \text{para } v \geq 3,13 \text{ m/s} \quad (22)$$

A condição de existência para a equação (22) deve-se ao fato de que o aerogerador só tem potência de saída para velocidades de vento maiores que 3,13 m/s. Utilizando os valores de velocidade média do vento da Tabela 6 na equação (22), pode-se construir a Tabela 7.

Tabela 7 – Potência média teórica de saída do aerogerador (W).

Período (mês)	Potência (W)
Dez. – Fev.	0,0
Mar. – Maio	3,418
Jun. – Ago.	15,000
Set. – Nov.	7,215

Fonte: Autor.

Pode-se construir a Tabela 8 com os valores de energia gerada por mês E calculados a partir das potências dadas pela Tabela 7 na equação (23):

$$E = P \cdot t \rightarrow E = P \cdot 24 \text{ [Wh/dia]} \rightarrow E = P \cdot 24 \cdot 30 \text{ [Wh/mês]} \quad (23)$$

Tabela 8 – Energia média teórica de saída do aerogerador (Wh/mês).

Período (mês)	Energia (Wh/mês)
Dez. – Fev.	0,0
Mar. – Maio	2.460,96
Jun. – Ago.	10.800,00
Set. – Nov.	5.194,80

Fonte: Autor.

4.2 CÁLCULOS DA ENERGIA GERADA A PARTIR DO EXPERIMENTO

A Tabela 9 apresenta os valores obtidos durante os experimentos. A coluna *Energia lida* mostra os valores escritos no display LCD do SAD em cada um dos dias da coluna *Data*. A coluna *Energia gerada* mostra os valores de energia gerada durante um dia. A coluna *Tensão da bateria* mostra os valores medidos através do multímetro.

Tabela 9 – Dados obtidos com os experimentos.

Data	Energia lida (Wh)	Energia gerada (Wh/dia)	Tensão da bateria (V)
16 nov. 2016	80	80	11,3
17 nov. 2016	180	100	11,4
18 nov. 2016	270	90	11,5
19 nov. 2016	–	233,33	–
20 nov. 2016	–	233,33	–
21 nov. 2016	970	233,33	11,89
22 nov. 2016	1.080	110	11,9
23 nov. 2016	1.220	140	11,9
24 nov. 2016	1.420	200	12,0

Fonte: Autor.

Nos dias 19 nov. 2016 e 20 nov. 2016 não foram realizadas medições de energia. Por isso, para o cálculo da energia gerada nos dias citados (E_{19} e E_{20} , respectivamente) foi utilizada a equação (24) com a média da energia gerada por dia no período de 19 nov. 2016 a 21 nov. 2016.

$$E_{19} = E_{20} = E_{21} = \frac{970-270}{3} = 233,33 \text{ Wh/dia} \quad (24)$$

Sendo E_{21} a energia gerada na data 21 nov. 2016.

Considerando os dados de energia gerada por dia da Tabela 9, pode-se calcular a média da energia gerada \bar{E} por dia no mês de novembro através da equação (25):

$$\bar{E} = \frac{1420}{9} \therefore \bar{E} = 157,778 \text{ Wh/dia} \quad (25)$$

Pode-se calcular também a energia média gerada no mês de novembro \bar{E}_{nov} com a equação (26):

$$\bar{E}_{nov} = 157,778 \cdot 30 = 4733,34 \text{ Wh/mês} \quad (26)$$

Comparando \bar{E}_{nov} calculado na equação (26) com a energia média teórica do mês de novembro $\bar{E}_{nov,teórico}$ retirada da Tabela 8, calcula-se o parâmetro μ na equação (27).

$$\mu = \frac{\bar{E}_{nov}}{\bar{E}_{nov,teórico}} = \frac{4733,34}{5194,80} = 0,9111 = 91,11\% \quad (27)$$

Nesse trabalho, o parâmetro μ calculado na equação (27) é utilizado para verificar a confiabilidade dos valores de energia medidos. Como o valor \bar{E}_{nov} é 91,11% do $\bar{E}_{nov,teórico}$, isso significa que os dados medidos estão muito próximos dos valores esperados.

Com isso, multiplicando o parâmetro μ pelos valores de energia calculados na Tabela 8, é possível estimar a energia média gerada pelo aerogerador nos demais meses do ano, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Energia média do aerogerador (Wh/mês).

Período (mês)	Energia (Wh/mês)
Dez. – Fev.	0,0
Mar. – Maio	2.242,18
Jun. – Ago.	9.839,88
Set. – Nov.	4.732,98

Fonte: Autor.

Por fim, com base na Tabela 10, que apresenta a energia gerada por mês em períodos de três meses, pode-se calcular a energia gerada no ano \bar{E}_{ano} através da equação (28):

$$\bar{E}_{ano} = 3 \cdot (2242,18 + 9839,88 + 4732,98) = 50445,12 \text{ Wh/ano}$$

$$\bar{E}_{ano} = 50,5 \text{ kWh/ano} \quad (28)$$

4.3 CUSTOS ENVOLVIDOS E DISCUSSÕES

Nesta seção é feita uma estimativa de preços para implementação de um projeto de geração de energia eólica.

São avaliados os custos dos itens aerogerador, inversor, bateria, torre, cabos e manutenção. Em seguida, com base nos valores obtidos na seção 4.2, será quantificado o custo da energia elétrica economizada e o tempo para retorno do investimento.

O aerogerador é um dos itens que mais encarece a implementação de um sistema de energia eólica. Além disso, o seu preço final varia muito, pois depende de muitos parâmetros.

A seguir, a Tabela 11 apresenta os preços de alguns aerogeradores pesquisados.

Tabela 11 – Modelos de aerogeradores e seus preços.

Modelo	Potência nominal (W)	Preço (US\$)
Air 40	160	849,00
Air Breeze	550	1.135,00
Air Silent X	400	1.429,00
Air X	400	1.135,00
Bergey XL	1.100	4.360,00
Kestrel e230i	800	2.540,00
Rutland 1200	500	1.733,00
Silent Wind	420	1.649,00

Fonte: Adaptado de EMARINE SYSTEMS (2016).

Neste trabalho, o aerogerador disponível é o Air Silent X da Primus Wind Power e seu preço é R\$ 4.897,18. O cálculo do preço do aerogerador foi feito com base na cotação do dólar em 25 nov. 2016 (US\$ 1,00 = R\$ 3,427) (BCB, 2016).

No caso de uma instalação de energia eólica em microgeração distribuída, não é necessário alto investimento em baterias, pois a energia não precisa ser armazenada e, em casos de muito vento e baixo consumo, a energia gerada pode ser injetada na rede elétrica.

Por isso, optou-se por utilizar baterias que garantam uma autonomia de 3,5 horas em uma residência com consumo médio de energia elétrica de 200 kWh/mês. O preço de uma bateria de 12 V para as condições citadas é de R\$ 1.100,00.

Quanto ao inversor, optou-se por um modelo com potência 500 W e transformação de tensão 12 V_{DC} para 110 V_{AC}, com preço médio de R\$ 150,00.

As dimensões da torre dependem muito da capacidade instalada da turbina em questão. Alguns modelos têm elevadores internos, que facilitam o acesso até o gerador, em caso de manutenção. Porém, para o caso em tela essa facilidade não se faz necessária. Segundo COSTA; CASOTTI; AZEVEDO (2009), na maioria das vezes, o fabricante do aerogerador é o responsável pela instalação da torre nas dependências do cliente e esse componente pode representar mais de 20% do custo total do equipamento. Neste trabalho, considera-se uma torre de 10,0 m de altura com um preço estimado de R\$ 1.000,00.

O cabo utilizado neste trabalho é um cabo de cobre trifilar e seção 4 mm². Seu preço estimado é de R\$ 450,00 (rolo com 100 m). No projeto em questão, será utilizado um cabo com 13,0 m de comprimento e custo estimado pela equação (29):

$$\frac{\text{R\$ } 450,00}{100 \text{ m}} \cdot 13 \text{ m} = \text{R\$ } 58,50 \quad (29)$$

Segundo COSTA; CASOTTI; AZEVEDO (2009), a necessidade de manutenção de um aerogerador é de aproximadamente 5 dias por ano. Com isso, o custo de manutenção de um sistema eólico pode ser considerado praticamente nulo.

Com as informações acima, o custo total C_{TOT} pode ser calculado pela equação (30):

$$C_{TOT} = C_A + C_B + C_I + C_T + C_C + C_M \quad (30)$$

$$C_{TOT} = 4.897,18 + 1.100 + 150 + 1.000 + 58,50 + 0 = \text{R\$ } 7.205,68$$

Sendo:

C_A : custo do aerogerador;

C_B : custo da bateria;

C_I : custo do inversor;

C_T : custo da torre;

C_C : custo do cabo;

C_M : custo de manutenção.

Um sistema de geração eólica tem como expectativa de vida útil um período de 20 anos (COSTA; CASOTTI; AZEVEDO, 2009). Os cálculos das energias elétricas geradas pelo aerogerador durante 20 anos C_1 e C_2 são dadas pela equação (31) e equação (32) respectivamente:

• bandeira verde: $C_{EE1} = \text{R\$ } 0,50057 / \text{kWh}$

$$C_1 = C_{EE1} \cdot \bar{E}_{\text{ano}} \cdot 20 = 0,50057 \cdot 50,5 \cdot 20 \therefore C_1 = \text{R\$ } 505,57 \quad (31)$$

• bandeira vermelha: $C_{EE2} = \text{R\$ } 0,53057 / \text{kWh}$

$$C_2 = C_{EE2} \cdot \bar{E}_{\text{ano}} \cdot 20 = 0,53057 \cdot 50,5 \cdot 20 \therefore C_2 = \text{R\$ } 515,88 \quad (32)$$

Sendo C_{EE1} e C_{EE2} os custos de um quilowatt-hora fornecidos pela concessionária EDP (2016) nas bandeiras verde e vermelha, respectivamente.

Comparando os valores obtidos pelas equações (31) e (32) com o valor obtido na equação (30), nota-se que o valor de energia elétrica economizada nesse período, foi muito menor que o custo do investimento estimado C_{TOT} . Porém, os custos de algumas parcelas para o cálculo de C_{TOT} podem ser minimizados.

Como pontuado anteriormente, um sistema eólico em microgeração distribuída não precisa necessariamente de uma bateria. Caso a bateria não seja utilizada haverá uma economia de R\$ 1.100,00 no valor de C_{TOT} .

Apresenta-se também como alternativa viável a substituição do aerogerador Air Silent X por um mais barato, como por exemplo, o Air 40 que possui potência nominal menor (vide Tabela 11). Essa economia no custo da aquisição do aerogerador não implica necessariamente em menor geração de energia, isso porque o Air 40 é capaz de gerar energia com velocidades de ventos mais baixas que o Air Silent X.

Ainda com o objetivo de diminuir os custos, tem-se a alternativa de instalar mais de um aerogerador na mesma torre. Além disso, esta opção aumenta a energia elétrica gerada. Após

20 anos de uso, período utilizado para os cálculos, pode-se substituir o aerogerador e manter a torre, diminuindo o custo do novo sistema de geração eólica.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivos analisar a viabilidade da implantação de um sistema de microgeração de eletricidade utilizando energia eólica na cidade de Guaratinguetá, desenvolver um medidor de energia DC utilizando arduino e salientar as vantagens e desvantagens da energia eólica.

Os resultados obtidos mostraram que o custo estimado na implantação do sistema descrito no trabalho ficou em torno de R\$ 7.200,00 para se gerar uma energia média estimada de aproximadamente 50,5 kWh/ano, a qual economizaria R\$ 500,00 do valor da tarifa de energia elétrica ao longo de vinte anos.

Através dos resultados obtidos, verificou-se que a instalação do aerogerador Air Silent X com a pá de PVC no Centro de Energias Renováveis em Guaratinguetá, com uma torre de 10 m de altura não é eficiente. Isso porque, este aerogerador utiliza controle estol e o ângulo de ataque da pá de PVC utilizada é diferente do ângulo da pá original. Sendo assim, a substituição da pá resultou em menor energia gerada.

Uma medida que pode ser tomada para melhorar o sistema estudado é a substituição das hélices. Hélices maiores e mais finas elevariam o torque e, conseqüentemente, a energia elétrica gerada. Além disso, devido aos baixos valores de velocidade média do vento na região, a instalação de um aerogerador que seja capaz de gerar energia elétrica a partir de velocidades de vento menores é mais adequada.

O parâmetro μ , calculado como sendo 91,11%, mostrou que a energia gerada medida pelo Sistema de Aquisição de Dados utilizando arduino no mês de novembro foi muito próxima àquela calculada pelo método teórico aplicado, que levou em conta os dados fornecidos pelo fabricante do aerogerador. Isso significa que o método aplicado é confiável e a plataforma arduino tornou possível a montagem de um sistema confiável e de fácil utilização.

A implantação de um sistema para geração de energia eólica em Guaratinguetá pode não ser economicamente viável em longo prazo. Porém, deve-se considerar que o vento é uma força da natureza, que não custa nada e está presente no local, sem investir nada. Sendo assim, a microgeração de eletricidade a partir da energia eólica viabiliza o fornecimento de energia elétrica para consumidores de regiões distantes, que não tem acesso a rede elétrica, melhorando a qualidade de vida dessa população.

Além disso, o desenvolvimento de uma indústria nacional voltada para este setor, tem o potencial de baixar o custo da implantação de sistemas eólicos. Neste contexto, salienta-se que é válido investir na geração de energia eólica, pois ela auxilia na diversificação da matriz energética, tornando-a mais sustentável e menos dependente de uma só fonte de energia, sem causar grandes impactos ambientais.

Para trabalhos futuros sugere-se analisar o rendimento elétrico-eólico do aerogerador utilizado neste trabalho. Outra sugestão é avaliar outros modelos de aerogeradores que sejam capazes de gerar energia sob velocidades de vento menores, como o Air 40, por exemplo. Sugere-se ainda, implementar um módulo para aferir a tensão do aerogerador e calcular a velocidade do vento pelo programa do SAD.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2005. 243p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Banco de Informações de Geração (BIG)**: Fontes de energia exploradas no Brasil. Tabela com o resumo da situação atual dos empreendimentos para geração de energia elétrica. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>>. Acesso em 29 out. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Banco de Informações de Geração (BIG)**: Capacidade de Geração Eólica do Brasil. Tabela com usinas do tipo eólicas em operação. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp>>. Acesso em 29 out. 2016.

ALDABÓ, R. **Energia Eólica**. São Paulo: Artliber Editora, 2002. 156p.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A.L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Eletrobrás, 2001. 45p.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – BCB. **Taxas de câmbio**: cotação do dólar. Disponível em <<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpsq.asp?id=txcotacao>>. Acesso em 25 nov. 2016.

BARIFOUSE, R.; SCHREIBER, M. Como o Nordeste virou principal polo da energia eólica no Brasil. **BBC BRASIL**, São Paulo e Brasília, 13 nov. 2015. Disponível em <http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/11/151110_energia_eolica_nordeste_rb>. Acesso em 29 out. 2016.

BOSSANYI, E.; BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D. **Wind Energy Handbook**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001. 617p.

Brasil é o quarto país em que energia eólica mais cresce no mundo. **PORTAL BRASIL**, Brasília, 15 jan. 2016. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/brasil-e-um-dos-principais-geradores-de-energia-eolica-do-mundo>>. Acesso em 29 out. 2016.

COSTA, R. A.; CASOTTI, B. P.; AZEVEDO, R. L. S. Um panorama da indústria de bens de capital relacionados à energia eólica. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 29, p. 229-277, mar. 2009.

DELTA VOLT. **Energias Renovables**: Energía Eólica o de Viento. Disponível em <<http://deltavolt.pe/energia-renovable/eolica>>. Acesso em 29 out. 2016.

DUTRA, R (Organizador). **Energia Eólica**: Princípios e tecnologias. Rio de Janeiro: CEPTEL, 2008. 58p.

EDP. **Tabela de tarifas de energia para consumidores de baixa tensão:** Subgrupo B1, válidas para leituras a partir de 01 fev. 2016. Disponível em <<http://www.edp.com.br/distribuicao/edp-bandeirante/informacoes/comerciais/tarifas-de-fornecimento/Documents/TABELA%20DE%20TARIFAS%20BT%20PRE%C3%87OS%20AERTOS%2001%2002%202016%20EDP%20Bandeirante.pdf>>. Acesso em 25 nov. 2016.

EMARINE SYSTEMS. **Custos de aerogeradores.** Disponível em <<https://www.emarineinc.com/categories/wind-turbines>>. Acesso em 21 nov. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional:** Ano Base 2015. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2016. 296p.

ENERGIA PURA. **Aerogerador Air Silent X:** Especificações técnicas. Disponível em <<http://www.energiapura.com/aerogerador-air-silent-x>>. Acesso em 21 nov. 2016.

FLEMING, J. A. S. P. **Previsão de curta duração da produção de energia eólica.** 2009. 73 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2009.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL – GWEC. **Global Wind Report 2015.** Disponível em <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf>. Acesso em 29 out. 2016.

MARTIN, J.M. **A Economia Mundial da Energia.** São Paulo: Unesp, 1992.

McROBERTS, M. **Arduino Básico.** São Paulo: Novatec Editora, 2011. 453p.

MONTEZANO, B. E. M. **Estratégias para identificação de sítios eólicos promissores usando sistema de informação geográfica e algoritmos evolutivos.** 2012. 215 f. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Civil) – COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PRIMUS WIND POWER. **Manual dos aerogeradores AIR:** instalação, operação e manutenção, atualizado em 2013. Disponível em <http://www.primuswindpower.com/files/8514/2973/5527/Primus_Air_Manual_English.pdf>. Acesso em 21 nov. 2016.

SILVA, P. C. **Sistema para tratamento, armazenamento e disseminação de dados de vento.** 1999. 125 f. Tese de Mestrado (Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica) – COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

TOLMASQUIM, M. T. (Organizador). **Fontes Renováveis de Energia no Brasil.** Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2003. 515p.