

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
CAMPUS NATAL
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
BACHARELADO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ZAIRA MARQUES DE SOUZA

**ESTIMATIVA DO CUSTO DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA EÓLICO
DE PEQUENO PORTE PARA CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA
RESIDENCIAL**

NATAL
2016

ZAIRA MARQUES DE SOUZA

**ESTIMATIVA DO CUSTO DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA EÓLICO
DE PEQUENO PORTE PARA CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA
RESIDENCIAL**

Monografia apresentada ao departamento de ciência e tecnologia como requisito para a obtenção do título de bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Brismark Goés da Rocha

NATAL

2016

ZAIRA MARQUES DE SOUZA

**ESTIMATIVA DO CUSTO DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA EÓLICO DE
PEQUENO PORTE PARA CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL**

Monografia apresentada à Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN- como requisito para a obtenção do título de bacharel em Ciência e Tecnologia.

Aprovada em _____ de _____ de _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Brismark Goés da Rocha - Orientador
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Carlos André Guerra Fonseca
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Profª. Dra. Andrea Jane da Silva
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Dedico este trabalho ao meu irmão, Zahir Marques, o melhor presente que ganhei da vida. E aos meus pais, que são meu porto seguro. Sem eles, não teria conseguido chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, como ser supremo e criador de todas as coisas, que na sua infinita bondade me permitiu chegar até aqui, dando-me força, saúde e sabedoria para enfrentar os obstáculos.

Aos meus pais, Maria Conceição e Sergivaldo Marques, pelo apoio psicológico e financeiro, pela paciência, dedicação e principalmente pelo incentivo nas horas difíceis de desânimo e cansaço.

A UERN, por seu corpo docente altamente capacitado, que contribuiu na forma de aprendizado, especialmente a professora Andrea Jane, pelo apoio e por ser uma excelente profissional, que contribuiu de forma direta para a conclusão deste trabalho.

Principalmente, ao meu orientador Brismark Góes, excelente profissional, pela disposição e empenho dedicado a orientação deste trabalho, pois seus conhecimentos foram de total importância para a realização do mesmo.

Aos irmãos na amizade, que participaram da minha jornada acadêmica. Especialmente as minhas irmãs Geovana e Luana, pelos conselhos, confiança, pela força, amizade, pelo companheirismo nos estudos em sala de aula e em casa e por todos os momentos compartilhados.

A minha família, por estar sempre presente nos bons e maus momentos, pelo incentivo e confiança.

E a todos aqueles que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida, com certeza. O meu muito obrigada!

RESUMO

Devido ao alto custo da energia elétrica e a sua demanda cada vez maior, fica evidente a necessidade de buscar fontes de energia alternativas. Nesse cenário, a energia eólica pode ser apontada como uma fonte de energia bastante viável, uma vez que se trata de uma fonte limpa e de baixo custo. O objetivo deste estudo é fazer a estimativa do custo de implantação de um sistema eólico de pequeno porte para consumo de energia elétrica residencial. Este estudo se justifica por dar ao consumidor que queira instalar um sistema eólico em sua residência a ideia de quanto será gasto com o sistema e também por apontar se o investimento é vantajoso economicamente ou não. Para que o objetivo fosse alcançado, foi considerada a velocidade do vento, o custo dos aerogeradores no mercado nacional; o consumo de energia elétrica residencial, que será identificada através de uma fatura da COSERN, referente ao mês; e a potência do aerogerador ideal para cada consumo residencial. Em seguida, foi calculado o tempo de retorno do investimento para um consumidor que queira adquirir esse sistema, de modo a desfrutar de suas vantagens e benefícios. E por fim, foi avaliado em qual situação o investimento será vantajoso. Para estimar o custo de implantação do sistema, foi elaborado um modelo baseado no método de regressão linear múltiplo, este modelo é composto pelas variáveis: custo, consumo mensal em kWh e velocidade do vento. Ao fim do estudo, foi possível concluir que o modelo se aplica, de forma satisfatória, para consumos no intervalo de 180 kWh/mês a 400 kWh/mês, tendo como base a velocidade média do vento igual a 6 m/s. Foi possível notar, também, que o custo de investimento na instalação do sistema eólico pode ser considerado vantajoso quando o tempo de retorno for inferior ao tempo de vida útil do aerogerador e que para o consumo médio mensal de energia elétrica residencial menor ou igual a 60 kWh/mês não é viável, devido ao tempo de retorno ser superior a vinte anos.

Palavras-chave: Energia eólica. Regressão linear. Sistema eólico residencial.

ABSTRACT

Due to high cost of electric energy and its increasing demand, it is evident the need of looking for alternative energy sources. In this case, wind power can be shown as the most viable renewable energy source, since it is a clean fountain and has low cost. The objective of this study is to make an estimate of the implantation cost of a small-sized wind power system for consumption of residential electric energy. This study is justified by giving the consumer, who wants to install a wind system in your home, the idea of how much will be spent with the system and also for pointing out if the investment is economically advantageous or not. For the objective be achieved, it was considered the speed of the wind, the cost of aero generators in the national market; the consumption of residential electric energy, that will be identified through a pay bill of COSERN, referring to the month; and calculated the return time of the investment for a consumer who wants to acquire this system, in way to enjoy its advantages and benefits. And finally, it was evaluated in which situation the investment will be advantageous. To appreciate the cost of the system implantation, it was prepared a model based on the method of multiple linear regression, this model is composed by the variables: cost, monthly consumption in kWh and speed of the wind. At the end of the study, it was possible to conclude that the model applies satisfactorily to consumptions in the range of 180 kWh/month to 400 kWh/month, having the wind average speed base equals to 6 m/s. It was possible to notice, also, that the cost of the investment of the installation of the wind power system can be advantageous when the time of return be inferior to the time of useful life of the aero generator and for the average monthly consumption of residential electric energy be less or equal to 60 kWh/month is not viable, due to the time of return be superior to twenty years.

Key-words: Wind power. Linear regression. Residential wind power system.

LISTA DE FIGURAS

1 - Potencial Eólico (geração por região) – Brasil.....	21
2 - Mapa dos Parques Eólico Brasileiros.....	22
3 - Primeiro Edifício no Brasil a funcionar com energia eólica.....	23
4 - Residência do Paraná abastecida com energia eólica	24
5 - Exemplo de uma instalação eólica.....	26
6 - Sistema de compensação de energia elétrica.....	27

LISTA DE TABELAS

1 - Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh)	15
2 - Geração por fontes alternativas no mundo - 10 maiores países em 2012 (TWh).....	19
3- Valor dos impostos que incidem sobre o consumo da classe B1.....	36
4- Análise de variância.....	37
5- Resumo da regressão.....	37
6- Tempo de retorno do investimento.....	40
7- Tempo de retorno do investimento para consumo de 60 kWh/mês.....	41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
COSERN	Companhia Energética do Rio grande do Norte
d.C.	Depois de Cristo
a.C	Antes de Cristo
Part.	Participação
CERNE	Centro de Estratégias em Recursos Naturais e Energias
NUTEMA	Núcleo Tecnológico de Energia e Meio Ambiente
PUC	Pontifícia Universidade Católica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
PIS	Programa de Integração Social
PF	Preço Final

LISTA DE SÍMBOLOS

GWh	Gigawatt-hora
$\Delta\%$	Varição em porcentagem
KW	Quilowatt
m/s	metro por segundo
TWh	Terawatt-hora
GW	Gigawatt
MW	Megawatt
KWh	Quilowatt-hora
I	Intensidade de turbulência
τ	Desvio padrão das variações de velocidade do vento
v	Velocidade do vento principal
E	Energia cinética
M	Massa de ar
v	Velocidade da massa de ar em movimento (vento)
P	Potência disponível no vento
μ	Fluxo da massa de ar
ρ	Massa específica do ar
A	Área da seção transversal
Pa	Pressão atmosférica do ar
R	Constante do ar
T	Temperatura ambiente
H	Altitude do local

X_j	Variáveis independentes
Y	Variável dependente
β_i	Coefficientes de regressão parciais
X_i	i -ésimo nível da variável independente X ($i=1,2,\dots,n$);
X_i^2	i -ésimo da variável independente X , elevado ao quadrado;
E_i	Erro que está associado à distância entre o valor observado Y_i e o correspondente ponto na curva para o mesmo nível i de X .
J	Joule
Kg	Quilograma
w	Watt
p	Pascal
$^{\circ}C$	Graus celsius
m	Metro
y	Custo
ε	Erro aleatório
σ^2	Variância
H_0	Hipótese nulo
H_1	Hipótese alternativa
Vel	velocidade do vento usada no modelo de regressão
P- value	propabilidade de rejeitar a hipótese nula

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA EÓLICA	17
2.1. IMPACTOS AMBIENTAIS	19
2.2. POTENCIAL EÓLICO DO BRASIL	20
2.2.2. Sistemas eólicos instalados em residências no Brasil	22
2.3. FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA EÓLICO.....	24
2.4. SISTEMA DE COMPENSAÇÃO	26
3. O VENTO	29
3.1. CARACTERÍSTICA DO VENTO DA ENERGIA EÓLICA.....	30
3.2. POTÊNCIA DO VENTO.....	30
3.3. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO	32
3.4. REGRESSÃO LINEAR.....	33
4. MODELO ESTATÍSTICO GERADO ATRAVÉS DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	35
4.1. APLICAÇÃO DO MODELO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DO CUSTO E DO TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO DE INSTALAÇÃO DE SISTEMA EÓLICO RESIDENCIAL....	38
5. CONCLUSÃO	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

A questão energética é um tópico de grande importância na atualidade, uma vez que, a qualidade de vida de uma sociedade está fortemente ligada ao seu consumo de energia elétrica. As perspectivas de esgotamento das reservas de petróleo e a elevação dos preços de mercado de combustíveis fósseis, aliados ao aumento do consumo de energia elétrica, tornam preocupante a segurança do suprimento de energia elétrica da sociedade.

Devido ao alto custo da energia elétrica e a sua demanda cada vez maior, fica evidente a necessidade de realização de pesquisas sobre fontes de energias renováveis.

As fontes eólicas têm se destacado como alternativa para o fornecimento de eletricidade, principalmente para regiões afastadas do sistema de distribuição convencional brasileiro onde o atendimento é inviabilizado. Uma das vantagens da energia eólica é que se trata de uma fonte renovável e limpa.

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores.
(BARBOSA et al, 2010, p.1)

Este estudo se justifica por dar ao consumidor que queira instalar um sistema eólico em sua residência a ideia de quanto será gasto inicialmente com o sistema e também por apontar se o investimento é vantajoso economicamente ou não.

É importante ressaltar que se a instalação do sistema eólico expandir no Brasil, haverá uma diminuição nos impactos. São exemplos desses impactos ambientais: poluição do ar, chuva ácida, emissão de gases causadores do efeito estufa, desmatamento, degradação costeira e marinha.

O sistema energético brasileiro é predominantemente de hidrelétrica, o que torna potencialmente vulnerável a falta de energia elétrica devido à baixa incidência de chuvas, que proporciona a redução de água nos reservatórios. Objetivando a diversificação da Matriz Energética Brasileira, buscando segurança e alternativas no abastecimento de energia elétrica, o Governo Federal do Brasil, em 2002 por meio do Decreto Lei nº 10.438 cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2002).

A tabela a seguir apresenta as fontes de energia elétrica mais utilizadas no Brasil, apontando a energia hidrelétrica como fonte predominante.

Tabela 1: Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh)

	2010	2011	2012	2013	2014	$\Delta\%$ (2014/2013)
Total	515.799	531.758	552.498	570.835	590.479	3,4
Gás Natural	36.476	25.095	46.760	69.003	81.075	17,5
Hidráulica (i)	403.290	428.333	415.342	390.992	373.439	-4,5
Derivados de Petróleo (ii)	14.216	12.239	16.214	22.090	31.668	43,4
Carvão	6.992	6.485	8.422	14.801	18.385	24,2
Nuclear	14.523	15.659	16.038	15.450	15.378	-0,5
Biomassa (iii)	31.209	31.633	34.662	39.679	44.733	12,7
Eólica	2.177	2.705	5.050	6.578	12.210	85,6
Outras (iv)	6.916	9.609	10.010	12.241	13.590	11,0

Fonte: Empresa de pesquisa energética (EPE), 2015.

A Tabela 1 mostra que as fontes mais utilizadas no Brasil são em grande parte derivadas do petróleo e que a energia hidráulica se destaca, o que torna preocupante o quadro energético brasileiro uma vez que enfrentamos grandes problemas ambientais relacionados a recursos hídricos e a escassez de chuvas periódicas. Vale ressaltar que, na tabela: i) inclui autoprodução; ii) são derivados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível; iii) biomassa: lenha, bagaço de cana e lixo.

Nestes termos, as fontes eólicas se tratam de uma alternativa viável, apesar de sua eficiência depender da velocidade do vento local, a mesma concilia desenvolvimento sustentável com eficiência energética atendendo às especificidades de cada região, além de possuir um custo acessível quando comparada a outras fontes.

O objetivo geral deste trabalho é realizar a estimativa do custo de um sistema eólico para geração de energia elétrica para consumo residencial, levando em consideração a velocidade do vento, a quantidade de energia média consumida na residência, custo do aerogerador e instalação de inversores.

Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos devem ser cumpridos, tais como: avaliar o custo dos aerogeradores no mercado nacional, avaliar o consumo médio de energia elétrica residencial, registrada na fatura da Companhia Energética do Rio grande do Norte (COSERN); identificar a potência do aerogerador ideal para cada consumo residencial; avaliar o tempo de retorno do investimento em um sistema eólico residencial; e, por último, analisar em que situação o investimento é vantajoso ou não, levando em consideração as características da residência.

Para dar conta dos objetivos supramencionadas, foi realizada pesquisa experimental. Para Gil (2007) citado por Engel e Tolfo (2009, p.36), “a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.”

No desenvolvimento do trabalho serão realizadas as seguintes etapas:

- Coleta de dados através da análise documental a fim de identificar, no mercado nacional, o custo mais baixo do aerogerador, levando em conta sua configuração;
- Análise do consumo de energia elétrica registrada em uma fatura da Companhia Energética do Rio grande do Norte (COSERN), referente a residência a qual se deseja instalar o sistema.
- Avaliação, através de cálculos, do tempo necessário para o retorno do investimento, levando em conta o custo de instalação do sistema.
- Analisar se a instalação do sistema é viável economicamente para o consumidor. Para isso deve ser analisado, principalmente o consumo elétrico médio em kw/h na residência e a velocidade média do vento local.

Esta monografia foi dividida em 5 seções. Nesta seção, na introdução, têm-se o objetivo geral, os objetivos específicos e a estruturação do trabalho, justificando a escolha do tema.

A seguir, na segunda seção, aborda-se o desenvolvimento da energia eólica, bem como estado da arte, são exemplificados os sistemas eólicos e descritos alguns de seus principais componentes de funcionamento.

A terceira seção se refere ao vento, suas características, potência e variação. Nele, também é discutido o método de regressão linear múltipla.

Na quarta seção é apontado o modelo gerado através do método de regressão linear múltipla, são apresentados os resultados obtidos, bem como a análise dos mesmos, buscando alcançar o objetivo principal do trabalho por meio da estimativa do custo de instalação de um sistema eólico para consumo de energia elétrica residencial.

Finalmente, a última seção, apresenta-se as conclusões referentes ao estudo.

2. DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA EÓLICA

É difícil apontar ao certo o exato momento na história em que foi descoberta a energia eólica.

Acredita-se que foram os egípcios os primeiros a fazer uso prático do vento. Em torno do ano 2800 a.C. eles começaram a usar velas para ajudar a força dos remos dos escravos. Eventualmente, as velas ajudavam o trabalho da força animal em tarefas como moagem de grãos e bombeamento de água (ALVES et al, 2016, p. 12).

Os moinhos de vento utilizados para moagem de grãos e bombeamento de água em atividades agrícolas foram as primeiras aplicações da energia eólica.

De acordo com Alves et al (2016, p. 12):

Os persas começaram a usar a força do vento poucos séculos antes de Cristo e, por volta de 700 d.C., eles estavam construindo moinhos de vento verticais elevados para serem usados como força nas mós, na moagem de grãos. Mas, provavelmente foram os holandeses que desenvolveram o moinho de vento horizontal, com hélices, comuns nos campos dos holandeses e ingleses.

O desenvolvimento da navegação e o período das grandes descobertas de novos continentes foram propiciados em grande parte pelo emprego da energia dos ventos.

O grande desenvolvimento da aplicação da energia eólica para geração de eletricidade iniciou-se na Dinamarca em 1980 quando as primeiras turbinas foram fabricadas por pequenas companhias de equipamentos agrícolas. Estas turbinas possuíam capacidade de geração (30-55 kW) bastante reduzida quando comparada com valores atuais. Políticas internas favoreceram o crescimento do setor, de maneira que, atualmente, a Dinamarca é o país que apresenta a maior contribuição de energia eólica em sua matriz energética e é o maior fabricante mundial de turbinas eólicas (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008, p.2).

Desde então, os investimentos nessa tecnologia não cessaram e a energia eólica foi se desenvolvendo mundialmente e em escala comercial, principalmente com a crise mundial do petróleo.

No início da década de 1970, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência de petróleo e carvão (SILVA ,2013, p.17).

Foi nesse período que a energia eólica ganhou mais destaque e passou a ser reconhecida mundialmente como uma alternativa privilegiada para a geração de eletricidade. Principalmente por ser apontada como a fonte de energia renovável mais promissora para a produção de eletricidade, em curto prazo, considerando aspectos de segurança energética, custo sócio ambiental e viabilidade econômica.

Nos Estados Unidos, a partir de 1933, foram utilizados em larga escala aerogeradores de pequeno porte, geralmente de duas ou três pás tipo hélices. Um dos projetos bem sucedidos foi o aerogerador Jacobs, apresentando três pás, controle centrífugo de passo, diâmetro de 4,27 metros e pás de madeira tipo hélice. Esse sistema fornecia 1kW elétrico para velocidade de 5,5 m/s, representando respectivamente o consumo elétrico de uma residência típica e a velocidade média de vento conhecida na época (MARQUES, 2001, p. 11).

Segundo Marques (2001), a expansão do uso de aerogeradores de pequeno porte, destinados ao fornecimento de energia elétrica domiciliar, prosseguiu entre as décadas de trinta até a década de sessenta com 12 vendas nos Estados Unidos e também em outros países. O sistema de controle do modelo Jacobs (o grande sucesso americano) possibilitou maior segurança ao gerador em ventos fortes, incluindo furacões e tempestades.

Com o avanço da rede elétrica, foram feitas, também no início do século XX, várias pesquisas para o aproveitamento da energia eólica em geração de grandes blocos de energia. Enquanto os Estados Unidos estavam difundindo o uso de aerogeradores de pequeno porte nas fazendas e residências rurais isoladas, a Rússia investia na conexão de aerogeradores de médio e grande porte diretamente na rede (MARQUES, 2001, p. 25).

A Segunda Guerra Mundial contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de grande e médio porte, uma vez que os países em geral procuravam economizar combustíveis fósseis.

O aproveitamento da energia eólica será de vital importância em um futuro próximo, pois suprirá as necessidades de populações de pequeno porte, deixando a demanda maior de energia recair sobre as fontes convencionais de energia, pois como se sabe uma indústria necessita de uma demanda muito maior de energia que uma população. Espera-se que com o avanço da tecnologia a implantação de fontes de energia alternativas será suficiente para todas as demandas de energia do planeta (ALVES. et al, 2006).

Portanto, como mostra a Tabela 2, a tendência futura é a passagem de um mundo movido por poucas fontes energéticas para um cenário diversificado, onde a energia elétrica alternativa cresce cada vez mais, já que se tratam de fontes mais viáveis, pelo fato de conciliar desenvolvimento sustentável com eficiência energética atendendo às especificidades de cada região.

Tabela 2 – Geração por fontes alternativas no mundo – 10 maiores países em 2012 (TWh)

	2008	2009	2010	2011	2012	$\Delta\%$ (2012/2011)	Part. % (2012)
Mundo	560,5	646,7	765,4	934,5	1.068,8	14,4	100
Estados Unidos	137,9	156,2	180,0	208,1	232,1	11,5	21,7
China	17,4	29,8	57,1	110,0	147,2	33,8	13,8
Alemanha	74,2	80,8	89,4	109,7	121,7	11,0	11,4
Espanha	39,6	48,4	56,0	57,0	66,4	16,5	6,2
Itália	18,2	21,9	28,0	40,0	50,3	26,0	4,7
Japão	30,4	30,7	33,8	35,3	47,6	34,8	4,5
Brasil ¹	20,7	23,9	33,7	34,9	40,3	15,5	3,8
Índia	15,8	19,9	22,1	30,8	35,4	14,8	3,3
Reino Unido	18,2	21,7	23,6	30,6	35,0	14,4	3,3
França	12,0	14,6	17,9	22,0	24,6	12,3	2,3
Outros	176,3	198,9	223,7	256,0	268,0	4,7	25,1

Fonte: Empresa de pesquisa energética (EPE), 2015.

De acordo com Delgado (2009, p. 17), “[...] estudos efetuados na região Nordeste, principalmente no Ceará e em Pernambuco, possibilitaram a primeira versão do Atlas Eólico da Região Nordeste, e estudos posteriores resultaram no Mapa do Potencial Eólico Brasileiro apresentando uma estimativa da ordem de 143 GW.”

2.1. IMPACTOS AMBIENTAIS

A energia eólica apresenta vários pontos positivos, dentre eles estão:

- Transformação limpa de um recurso energético natural, o vento, não produzindo resíduos poluentes;
- O sistema é bastante durável;
- Trazem oportunidades de eletrificação de regiões remotas;
- Sua tecnologia e flexibilidade podem ser usadas para alimentar isoladamente residências e edifícios;
- A vida útil de uma turbina é de 20 anos;
- Os projetos são simples e baratos de fazer;
- A conversão de energia eólica em energia elétrica é eficiente (59% de rendimento teórico) (OLIVEIRA, 2011, p.63)

Estes pontos positivos são confrontados com alguns pontos negativos, como:

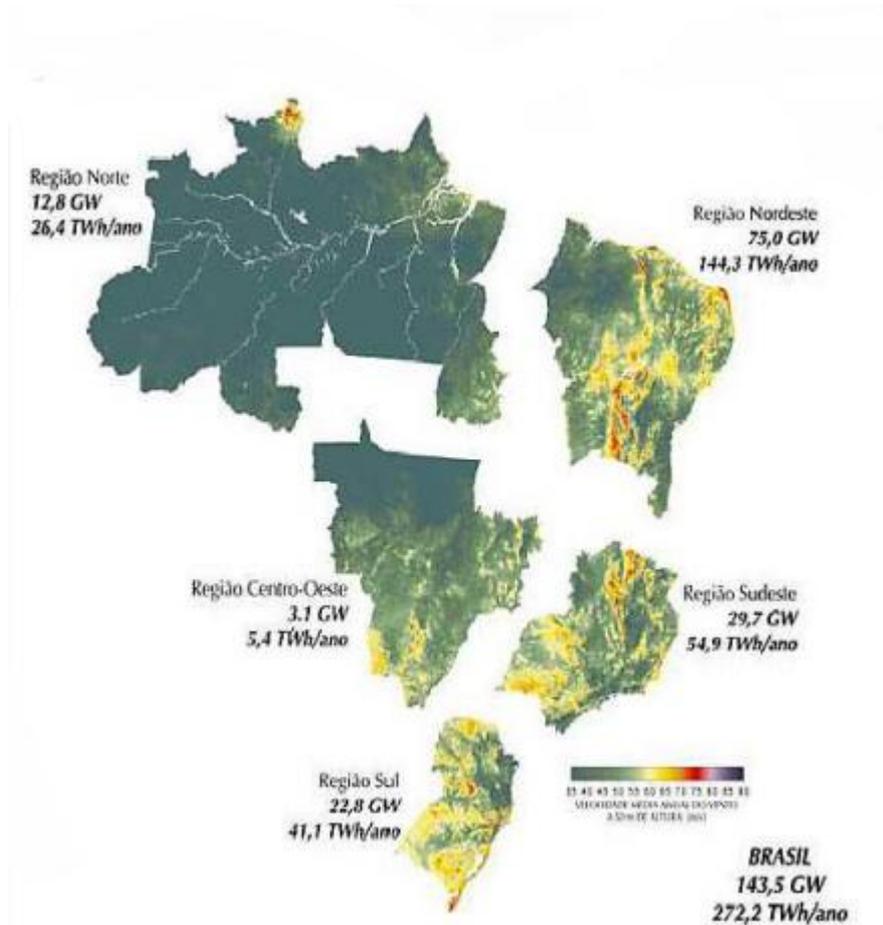
- Poluição visual e sonora;
 - As pás das turbinas produzem sombras e reflexos móveis que também são indesejáveis nas áreas residenciais;
 - Pode ocorrer mortalidade de vários tipos de aves por baterem em vários pontos do aerogerador;
 - As baterias são consideradas o ponto crítico do sistema, pela pouca durabilidade;
 - Necessita de ventos constantes, nem muito fracos e nem muito fortes.
- (OLIVEIRA ,2011, p.64)

As principais queixas, por parte da população, envolvendo a energia eólica se tratam da poluição sonora e visual, sonora e visual, sobre desvalorização imobiliária das propriedades vizinhas dos gigantes cataventos, alteração nos componentes geoambientais (água, solo, morfologia, topografia e paisagem), alteração dos fluxos das marés e até alegações mais extremas como a que atribui aos sons e vibrações dos aerogeradores impactos fisiológicos como taquicardia, náuseas e visão turva (OLIVEIRA, 2011, p.65).

2.2. POTENCIAL EÓLICO DO BRASIL

O Brasil é o 13º no “Ranking” global de geração de energia eólica, em 2013, com 3,456 GW, sendo o 7º país que mais elevou a capacidade instalada em 2013. O país conta com uma carteira de novos projetos já contratados de mais de 7.000 MW para serem entregues até 2016. Esta cifra já coloca o Brasil entre os 10 maiores mercados para tecnologia de energia eólica do mundo (CERNE, 2014, p. 7).

Segundo a CERNE (2014), desde 2010, a China já é o maior produtor de energia eólica do planeta. No Brasil, a região nordeste é a que mais se destaca em termos de potencial eólico, como se pode ver na Figura 3. Tendo como destaque os estados: Rio Grande do Norte, Ceará e Bahia.

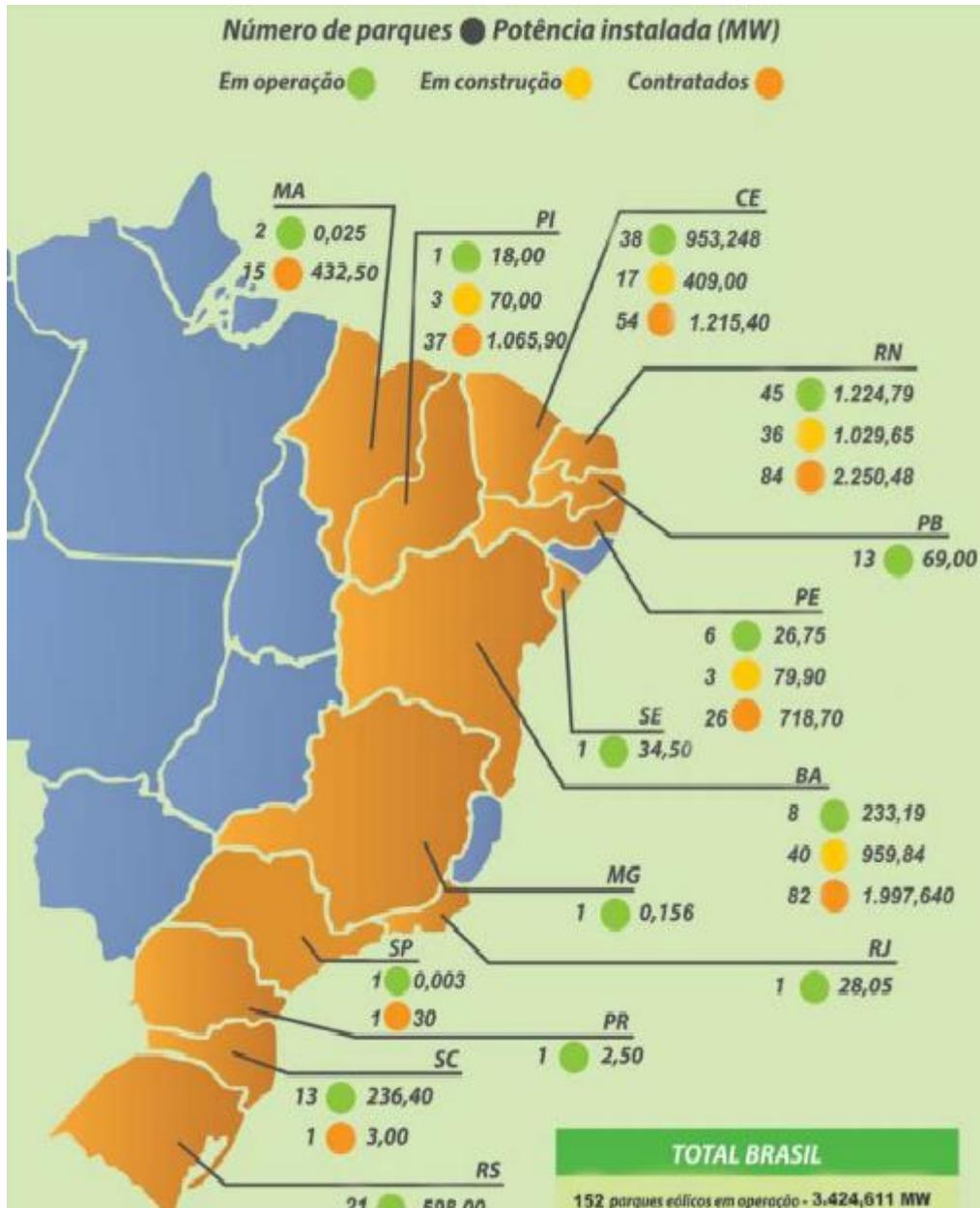
Figura 1: Potencial Eólico (geração por região) - Brasil

A figura 1 mostra que o Nordeste apresenta mais da metade do potencial eólico brasileiro. Esse potencial está localizado tanto na faixa litorânea quanto no interior da região, o que possibilita uma melhor distribuição dos parques eólicos.

De acordo com o Centro de Estratégias em Recursos Naturais e Energias (CERNE) (2014, p.4), “ao longo dos últimos sete anos, o Rio Grande do Norte ganhou destaque nacional e internacional ao conquistar o primeiro lugar geral em novos projetos eólicos licitados na série de leilões federais anuais envolvendo esta fonte renovável de energia, iniciada em 2009.”

Na Figura 2, têm-se um mapa dos parques eólicos brasileiros, contendo o número de parques e potência instalada de cada estado. Este mapa mostra que no Brasil existem 152 parques eólicos em operação, 120 parques eólicos em construção e 350 parques eólicos contratados.

Figura 2: Mapa dos Parques Eólicos Brasileiros



Fonte: CERNE, 2014

2.2.2. Sistemas eólicos instalados em residências no Brasil

O primeiro edifício no Brasil a funcionar com energia eólica foi o Edifício Eólis, localizado em Porto Alegre no Rio Grande do Sul.

De acordo com a Energia Pura, o Edifício Eólis foi inaugurado no ano de 2006, e contou com a tecnologia do “Energia Pura Empreendimento” em parceria com o Núcleo Tecnológico de

Energia e Meio Ambiente da PUC (NUTEMA) e com a administradora Auxiliadora Predial, que analisou os impactos do empreendimento.

O custo do equipamento (importado dos Estados Unidos - o mais avançado do mundo) gira em torno de R\$ 40 mil, e a expectativa é que o retorno do investimento venha em no máximo cinco anos [o edifício foi inaugurado em novembro de 2006]. Se as expectativas se concretizarem, existe a intenção de triplicar a produção de energia eólica no prédio (ENERGIA PURA).

Diante disso, é possível enxergar a viabilidade do projeto de instalação do sistema eólico residencial, pois além de ser uma iniciativa de preservação do meio ambiente, também pode ser uma alternativa viável em relação ao custo, já que terá um retorno no investimento.

Figura 3: Primeiro Edifício no Brasil a funcionar com energia eólica



Fonte: Energia Pura ,1993.

Na cidade de Cianorte, no Paraná, foi instalado, em uma residência, um aerogerador do modelo Skystream 3.7 com o objetivo de reduzir os gastos com eletricidade e o impacto ambiental da residência, do Grupo Nabhan de Tecnologia.

[...] equipamento[Skystream 3.7] líder mundial em vendas na categoria residencial em mais de 120 países. Pronto para conexão à rede elétrica (Grid Tie) o Skystream opera em conjunto com a concessionária de energia local, utilizando-a sempre que não há vento ou quando o consumo é maior do que a capacidade do aerogerador, que é de 2.4 kW de potência nominal. (ENERGIA PURA).

Figura 4: Residência do Paraná abastecida com energia eólica



Fonte: ENERGIA PURA, 1993.

2.3. FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA EÓLICO

Um aerogerador pode ser entendido como um gerador elétrico movido por uma hélice, que, por sua vez, é movida pela força do vento.

O sistema eólico é composto por diversos componentes que trabalham em harmonia afim de conceder um maior rendimento final ao sistema. De acordo com Alves et al (2006, p.29), alguns dos componentes fundamentais para a conversão da energia eólica em energia elétrica são:

- a) Vento: Combustível do sistema. Disponibilidade energética do local;
- b) Rotor: Através de efeitos aerodinâmicos transforma a energia cinética, presente nos ventos, em energia mecânica de rotação;
- c) Gerador Elétrico: Converte a energia mecânica de rotação em energia elétrica utilizável;
- d) Suporte ou torre: Responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente;
- e) Transformador: Responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica.

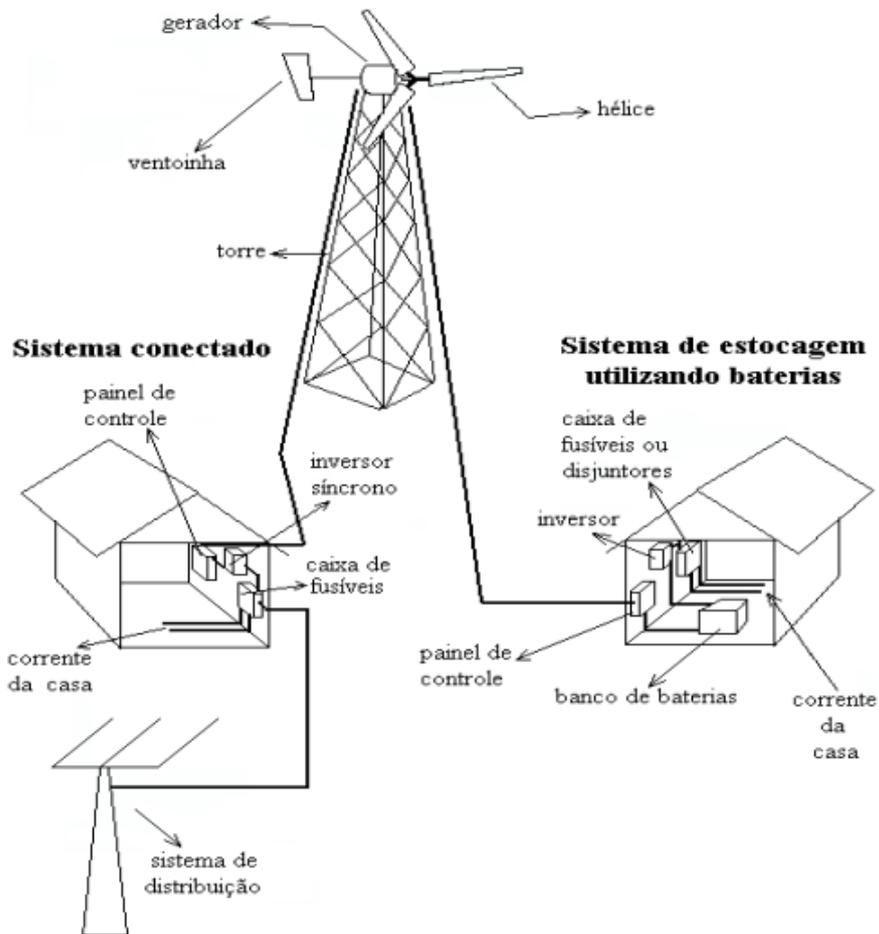
A quantidade de energia eólica retirada de uma determinada região depende das características de desempenho, altura de operação e espaçamento horizontal dos sistemas de conversão de energia eólica instalados.

Conforme Alves et al (2006), existem três tipos de sistema::

- Sistemas isolados: são todos os sistemas que se encontram privados de energia elétrica proveniente da rede pública. Armazenam a energia do aerogerador em baterias estacionárias, que permitem consumir energia quando não houver vento necessário para produzir energia, evitando que falte energia elétrica quando o aerogerador parar. Porém, para poder consumir a energia que o aerogerador produz é necessário alterar a corrente elétrica, pois as tensões produzidas não são compatíveis com os aparelhos domésticos ou industriais. Para isso é usado um inversor senoidal de corrente que transforma a corrente contínua em corrente alternada. Possibilitando que a energia seja utilizada.
- Sistemas híbridos: são aqueles que apresentam mais de uma fonte de energia, por exemplo, uma combinação de energia eólica e energia solar. Por apresentar mais de um tipo de geração de energia, o sistema híbrido tem uma complexidade maior e até mesmo uma maior eficiência. Estes são empregados em sistemas de médio porte destinados a atender um número maior de usuários. Os sistemas híbridos apresentam basicamente o mesmo princípio de funcionamento do sistema isolado, a diferença é que no híbrido o gerador será abastecido por duas fontes de energia.
- Sistemas interligados à rede: não necessitam de baterias para o armazenamento de energia. Estes sistemas representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão interligados. Têm como vantagem a redução de perdas e do custo do sistema.

Na Figura 5, tem-se um exemplo de uma instalação eólica, utilizando o sistema conectado à rede, também conhecido como sistema de compensação, e o sistema de estocagem utilizando um banco de baterias.

Figura 5: Exemplo de uma instalação eólica



Fonte: ALVES et al, 2006.

É importante ressaltar que o sistema conectado ou sistema de compensação será o foco deste trabalho, principalmente pelo fato de reduzir o custo de implementação do sistema e a manutenção de sistemas de pequeno porte.

2.4. SISTEMA DE COMPENSAÇÃO

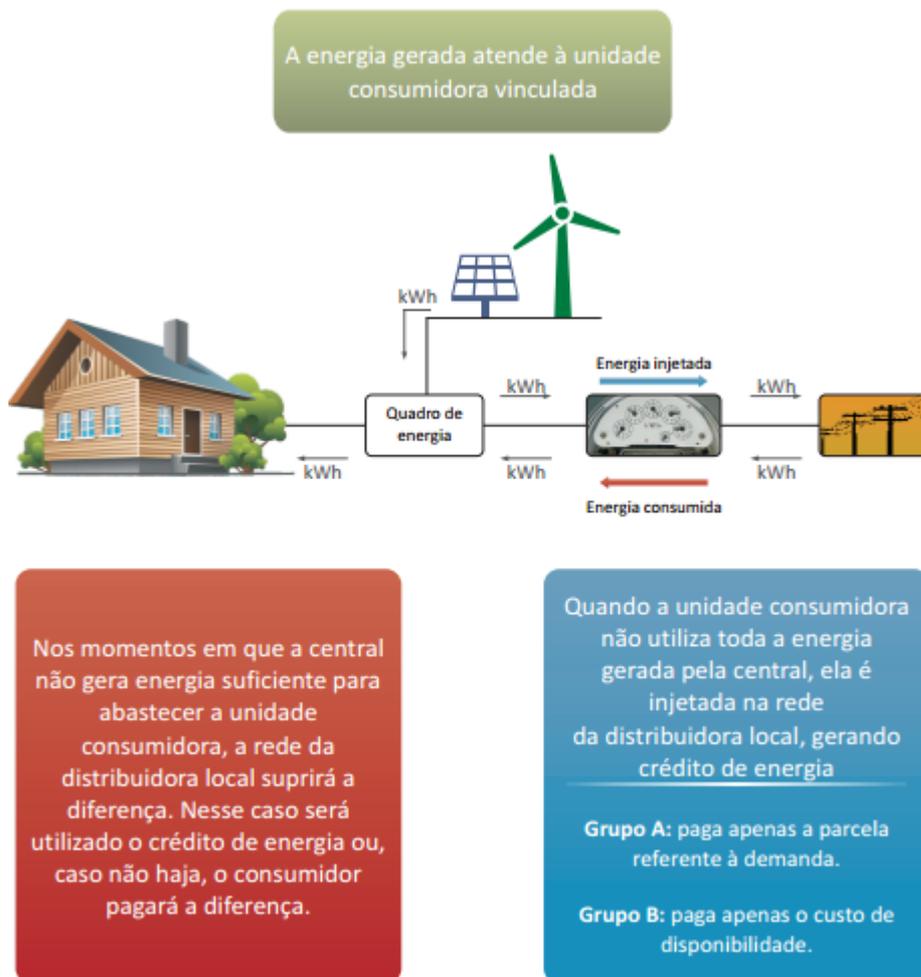
Embora os aerogeradores necessitem de pouca manutenção, o manual de instruções do equipamento exige uma verificação a cada seis meses. Já o banco de baterias é o item que requer mais atenção no conjunto, pois, além de possuir um custo elevado, as baterias possuem vida útil muito curta, já que é determinada pelo número de ciclos de carga e descarga a qual é submetida.

Como já foi citado anteriormente, a energia proveniente do sistema eólico pode ser injetada diretamente na rede distribuidora, o que descarta a utilização de um banco de baterias, componente de custo significativo para o sistema.

Uma importante inovação trazida pela Resolução Normativa nº 482/2012 é o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Esse sistema permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora, a qual funcionará como uma bateria, armazenando esse excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia proveniente da distribuidora. Dessa forma, a energia elétrica gerada por essas unidades consumidoras é cedida à distribuidora local, sendo posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica dessa mesma unidade consumidora (ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade). (ANEEL, 2014, p.16).

Na Figura 7, tem-se o exemplo de um sistema de compensação de energia elétrica.

Figura 6: Sistema de compensação de energia elétrica



Em síntese, a energia excedente gerada pela unidade consumidora deverá ser injetada na rede distribuidora que funcionará como uma bateria armazenando esta energia. Quando o consumo de energia da central consumidora não puder ser atendido devido a alguns fatores que acarretam uma queda de eficiência no sistema, a distribuidora então fornecerá energia elétrica para a central consumidora, funcionando como um empréstimo de energia. Por esse motivo, dá-se o nome de sistema de compensação.

Com essa resolução, não se faz mais necessária a utilização de um banco de baterias, o que reduz o custo de implementação e manutenção de sistemas eólicos de pequeno porte. É uma nova realidade para os consumidores brasileiros, que necessitam de uma metodologia para realizar estudos de dimensionamento e investimentos na geração de energia elétrica, para poder optar em ter mais um aporte de energia elétrica. Portanto, este trabalho contribuirá em uma metodologia que auxiliará esses consumidores na tomada de decisão quanto à implantação de um sistema eólico de pequeno porte.

É importante ressaltar que se em um determinado ciclo de faturamento a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) na fatura seguinte. Caso contrário, o consumidor pagará apenas a diferença entre a energia consumida e a gerada. Sendo assim, quando a central não gerar energia suficiente para abastecer a unidade consumidora, a rede da distribuidora local suprirá a diferença. Nesse caso, será utilizado o crédito de energia ou, caso não haja, o consumidor pagará a diferença.

Conforme disposto nos regulamentos da ANEEL (2014, p.11), “a micro e a minigeração distribuída consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.”

A diferença entre micro e minigeração é que na microgeração de energia elétrica as centrais geradoras têm potência instalada menor ou igual a 100 quilowatts (kw), enquanto na minigeração refere-se a centrais geradoras com potência instalada superior a 100 kW.

As vantagens do sistema eólico para geração de energia elétrica para consumo residencial são que, além do custo por kW gerado está reduzindo, se trata de uma fonte de energia totalmente renovável, pois não emite gases de efeito estufa, não emite gases poluentes, não gera resíduos na sua produção, é decorrente de uma transformação limpa do recurso energético natural (o vento) e o sistema é bastante durável e precisa de pouca manutenção. O uso do sistema eólico residencial pode viabilizar autossuficiência de regiões de consumo próximas. E o fato de oferecer baixo impacto ambiental e preços cada vez mais competitivos quando comparada a outras fontes também auxilia no desenvolvimento dessa fonte de energia.

3. O VENTO

Para a realização de um trabalho acadêmico que envolve energia eólica, não se pode deixar de ressaltar a principal fonte natural de estudo dessa energia, que é o vento.

Segundo Alves et al (2006, p.22):

O vento é a principal característica da movimentação das massas de ar existentes na atmosfera e o seu surgimento está diretamente relacionado às variações das pressões de ar que por sua vez é originada termicamente através da radiação solar e das fases de aquecimento das massas de ar, em torno de 1 a 2% da energia.

Assim, a energia eólica pode ser considerada como uma forma em que a energia proveniente do sol se manifesta.

As regiões tropicais que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos (BRITO, 2008, p.14).

Para Lopez (2012, p.33), “existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos polos) estão sempre presentes na natureza.”

Estes ventos são conhecidos como ventos planetários ou constantes. E segundo Brito (2008, p.15) podem ser classificados em quatro tipos, que são:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os polos, em altas altitudes.
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os polos.
- Polares: ventos frios que sopram dos polos para as zonas temperadas.

Além dos ventos planetários ou constantes, existem também os ventos locais que, segundo Brito (2008, p.16), “são originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados.”

3.1. CARACTERÍSTICA DO VENTO DA ENERGIA EÓLICA

É de extrema importância o conhecimento do comportamento do vento em uma determinada região para a instalação de um sistema eólico.

Segundo Lopez (2012), as características do vento variam em relação ao espaço e tempo e a característica mais importante a ser determinada é a variação da velocidade do vento, pois ele varia constantemente, ao longo do dia, mês e ano. A potência do vento pode aumentar em função da altura da torre em relação ao solo.

Com base em Lopez (2012) é importante ressaltar que o fator de rugosidade do terreno influencia na velocidade e turbulência do vento. Quanto mais rugoso for o terreno, maior será a turbulência e menor a velocidade do vento.

Para Lopez (2012, p.43), “a intensidade da turbulência é uma medida de vários níveis de turbulência e é definida como:”

$$I = \frac{\tau}{v} \quad (01)$$

Onde:

τ = desvio padrão das variações de velocidade do vento;

v = velocidade do vento principal.

A intensidade da turbulência (I) depende do terreno: das árvores, construções, altura acima do solo.

3.2. POTÊNCIA DO VENTO

Para Lopez (2012, p.37), “a energia cinética de uma massa de ar m em movimento a uma velocidade v é dada por”:

$$E = \frac{Mv^2}{2} \quad (02)$$

Onde:

E = energia cinética [J]

M = massa de ar [kg]

v = velocidade da massa de ar em movimento (vento) [m/s]

Lopez (2012, p.38) afirma “que a potência P disponível no vento é definida como a derivada da energia no tempo” e é expressada da seguinte forma:

$$P = \frac{\mu V^2}{2}$$

(03)

Onde:

P = potência disponível no vento [w];

 μ = Fluxo da massa de ar [kg/s];Uma vez que $\mu = \rho v A$, temos que:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

(04)

Onde:

 ρ = massa específica do ar [kg/m³];

V = velocidade do vento [m/s];

A = área da seção transversal [m²].

Considerando a mesma massa de ar “m” em movimento a uma velocidade “v”, perpendicular a uma sessão transversal de um cilindro imaginário, pode-se demonstrar que a potência disponível do vento que passa pela sessão A, transversal ao fluxo do ar, segundo Lopez (2012, p.39), “é dada por uma equação muito importante para a análise da energia eólica”:

$$DP = \frac{\rho}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3$$

(05)

Ainda com base em Lopez (2012, p.38), “as expressões de P e DP demonstram uma relação disponível no vento e a massa específica do ar. A massa específica do ar varia com a temperatura e a pressão atmosférica, conforme a expressão:”

$$\rho = \frac{Pa}{RT}$$

(06)

Onde:

 ρ = massa específica do ar [kg/m³];

Pa = pressão atmosférica do ar [Pa];

R= constante do ar [287J/kgK];

T= temperatura ambiente [K].

De acordo com Lopez (2012) como a altitude do local influencia na temperatura ambiente e a pressão atmosférica, a massa específica do ar é dependente de ambas. Expressão de estimativa da massa específica do ar, ou densidade, em função da altitude, do local e da temperatura ambiente:

$$\rho = \frac{353,4 \left(1 - \frac{H}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + T}$$

(07)

Onde:

ρ = massa específica do ar [kg/m³];

H= altitude do local [m];

T= temperatura ambiente.

3.3. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO

Existem vários fatores que determinam variações na velocidade do vento, entre estes fatores estão as ondas e os redemoinhos, as diferenças na temperatura do ar, a direção do vento (que pode ser do mar para a terra ou da terra para o mar).

O comportamento estatístico do vento ao longo do dia é um fator que é influenciado pela variação de velocidade do vento ao longo do tempo. As características topográficas de uma região também influenciam o comportamento dos ventos uma vez que, em uma determinada área, podem ocorrer diferenças de velocidade ocasionando a redução ou aceleração na velocidade do vento. Além das variações topográficas e também de rugosidade do solo, a velocidade também varia seu comportamento com a altura (LOPEZ, 2012, p. 34).

Levando em consideração a variação da velocidade que o vento pode correr, devem ser analisados alguns aspectos no local onde se deseja instalar as turbinas eólicas. Nesta análise, serão levados em consideração os principais fatores de influência no regime dos ventos.

Para Lopez (2012, p.35) os principais fatores de influência no regime dos ventos são:

- “Variação da velocidade com a altura;
- Rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;

- Relevo, que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.”

Um dos fatores que mais determina a variação da velocidade do vento em um determinado local é a altura. Esta variação da velocidade do vento com a altura é consequência da ação da viscosidade, que dá origem a Camada Limite Atmosférica.

Para Petry e Mattuella (2007) “C.L.A [Camada Limite Atmosférica] é exatamente o perfil da velocidade do vento obtida entre o vento perturbado pela rugosidade do terreno e pelo fluxo de calor na atmosfera e o vento geostrófico, não perturbado.”

Conforme Brito (2008, p.17), “as informações necessárias para o levantamento das condições regionais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos e de uma visita ao local de interesse para avaliar e modelar a rugosidade e os obstáculos.”

Verificar estes fatores é de extrema importância para se identificar se o local é viável para instalação de um sistema eólico.

Além disso, estudar a velocidade, frequência e turbulência do vento de um local é necessário, pois estes fatores contribuem para a eficiência do sistema, de forma positiva ou negativa. Estudar a região e o relevo é outro fator importante para conhecer regimes de ventos favoráveis ou não favoráveis para o sistema. Como por exemplo, terrenos planos ou pouco ondulados e com poucos obstáculos, assim como as regiões litorâneas, principalmente o nordeste brasileiro, costumam apresentar regimes de ventos bastante favoráveis para implantação do sistema eólico.

3.4 REGRESSÃO LINEAR

Baseado em Henriques (2011), a regressão linear consiste na análise da relação entre uma variável, chamada variável dependente e variáveis independentes. Este relacionamento é representado por uma equação que associa a variável dependente com as variáveis independentes.

O modelo citado acima se refere à regressão linear múltipla por apresentar mais de uma variável independente. Utilizar-se-á a regressão linear neste trabalho.

De acordo com Peternelli (2004) em outras palavras, a regressão linear múltipla envolve uma única variável dependente (y) e duas ou mais variáveis independentes ($X_i, i = 1, 2, \dots$). Logo, a equação tem como objetivo prever valores de y para valores dados das diferentes variáveis independentes.

O modelo de regressão linear múltipla, baseado em Peternelli (2004) é dado por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon, \quad (08)$$

Onde:

X_j = Variáveis independentes

Y = Variável dependente

β_i = Coeficientes de regressão parciais

4. MODELO ESTATÍSTICO GERADO ATRAVÉS DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

O custo de instalação de um sistema eólico depende de algumas variáveis como: a quantidade de energia que se deseja gerar, a velocidade do vento local, a potência do aerogerador, inversor, custo do projeto, custo de instalação e o número de aerogeradores utilizados. Para este estudo foi considerado um consumo de energia elétrica até 400 kWh/mês, a velocidade do vento de 3m/s de partida e máxima 12m/s. Essas velocidades são nominais para os aerogeradores de pequeno porte encontrados no mercado: skystream marine, skystream land, new breeze 500w, new breeze 1500w, breeze 550w, aerogerador Grid Tie – aerogerador que dispensa o uso de banco de baterias- com potência nominal de 0,5 a 1,0 kw,

Como foi citado no trabalho, a velocidade do vento não é constante e varia muito de região para região, por isso será admitida, para efeito de cálculos, a velocidade média do vento em Natal/RN (6 m/s). Além disso, foi utilizado o inversor com potência de 1000 W, com frequência 60 Hz que corresponde à frequência da distribuição da rede elétrica no Brasil. O custo do projeto e o custo de instalação foram tidos como sendo a média do mercado após contato com profissionais da área. Não foi considerado o custo de manutenção, pois, com o avanço da tecnologia, os sistemas têm requerido menos manutenção, maior tempo de vida útil dos equipamentos e mais eficiência, bem como o custo da torre, pois dependendo do local varia muito em relação à altura. Restando apenas o custo com o investimento. Os valores dos equipamentos foram obtidos por meio de pesquisa de mercado segundo a qual o dólar comercial de US\$ 1.00 equivalente a R\$ 3,80.

Na fatura da conta elétrica, foi observado o consumo médio para ser utilizado na estimativa do custo de implantação do sistema, por meio de um modelo de regressão linear múltiplo e o consumo ativo para obter o preço final (PF) em kWh por meio da equação (09), conseqüentemente o total da fatura com a inclusão da taxa de iluminação pública e considerando apenas a bandeira verde monofásica. O total da fatura é necessário para determinar o tempo de retorno do investimento. O tempo de retorno foi considerado para os consumidores da classe B1 sobre a qual incidem os impostos da Tabela 3 e o reajuste médio anual da tarifa elétrica que é variável conforme situação econômica no Brasil.

$$PF = \frac{\text{Consumo ativo}}{1 - (\text{ICMS}\% + \text{PIS} + \text{CONFINS})} \quad (09)$$

Tabela 3: Valor dos impostos que incidem sobre o consumo da classe B1.

Impostos	Até 60 kWh/mês	61 a 300 kWh/mês	Acima de 300 kWh/mês
ICMS (%)	0	18	27
CONFINS (%)	4,29	4,29	4,29
PIS (%)	1,36	1,36	1,36
Total (%)	5,65	23,65	32,65

Fonte: Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN).

Com base em um banco de dados contendo informações sobre a potência nominal dos aerogeradores, o custo do sistema eólico (incluindo o custo médio do projeto de R\$ 2.000,00, taxa média de instalação é de R\$ 1.500,00 e custo médio do inversor é de R\$ 1.500,00.

A partir do banco de dados, foi possível realizar uma análise de regressão linear múltipla, na qual é possível estimar o custo do investimento de um sistema de geração de energia elétrica eólica, contendo como variáveis independentes: o consumo mensal de energia elétrica que se deseja atender e a velocidade do vento e como variável dependente, o custo.

No uso do modelo, quando Y (custo) for menor do que US\$ 2.631,58 será admitido como sendo R\$ 10.000,00, pois corresponde a média de investimento mínimo no sistema eólico com base nos preço dos equipamento existentes no mercado.

Foi utilizado o teste F de Snedecor na análise de variância para testar se o modelo é linear, se os coeficientes do modelo proposto são significativamente diferentes de zero ao nível de significância de 5%. Para melhor agilização foi utilizado o programa Estatística versão 10, na obtenção do modelo e para obter o resultado do teste F. Snedecor.

Inicialmente, parte-se do princípio de que o modelo generalizado da regressão linear múltipla é do tipo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon, \quad (10)$$

Onde:

Y= Custo

X₁ = kWh/mês (consumo)

X₂= Velocidade do vento (m/s)

$\varepsilon \sim N(0; \sigma^2)$, (CHARNET, et. all, 2008).

Para testando o modelo generalizado, precisa-se de hipóteses, estas hipóteses são:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$$

H_1 : Pelo menos um $\beta_i \neq 0$, onde $i = 1, 2$.

Tabela 4: Análise de variância

Efeito	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F	p-value
Regressão	$3,933172 \times 10^9$	2	$1,966586 \times 10^9$	95,41348	0,000104
Residual	$1,030560 \times 10^8$	5	$2,061120 \times 10^7$		
Total	$4,036228 \times 10^9$				

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando a Tabela 4 e considerando um nível de significância de 0,05, pode-se rejeitar a hipótese H_0 , indicando que pelo menos um $\beta_i \neq 0$, $i = 1, 2$, isto é, o modelo é linear.

Tabela 5: Resumo da regressão

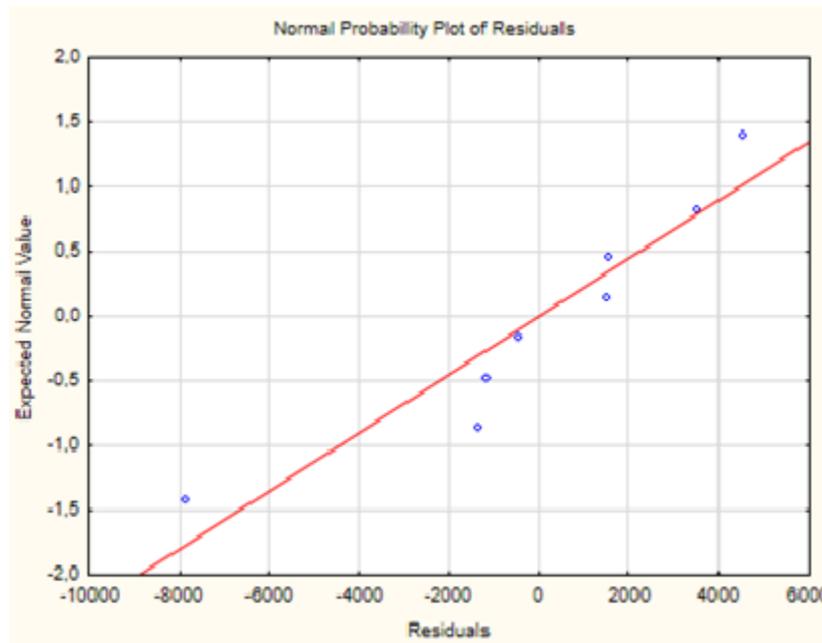
	Estimadores de β_i	Erro Padrão de β_i estimado	β_i	Erro Padrão de β_i	T-Student	p-value
Intercept			20602,42	10530,42	1,95647	0,107774
<i>kWh/mês</i>	0,891151	0,071575	120,71	9,69	12,45066	0,000059
<i>Vel</i>	-0,477996	0,071575	- 5368,31	803,84	- 6,67830	0,001135

Fonte: Elaborada pelo autor autor.

O modelo ajustado apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9683, o que significa que as variáveis: kWh/mês e a velocidade do vento contribuem em 96,83% toda a variação do custo, sendo 3,17% atribuídos a fatores aleatórios. Pode ser observado no Gráfico 1 que os erros são normalmente distribuídos, portanto, teremos o modelo ajustado como é indicado na Tabela 5:

$$Custo = 20.602.42 + 120,71kWh/mês - 5.368,31Vel \quad (11)$$

Onde: vel corresponde a velocidade do vento em m/s.

Gráfico 1: Da probabilidade normal dos resíduos

Fonte: Estatística versão 10.

Na Equação 11 é possível observar que a velocidade do vento influencia mais no custo do que o consumo de energia elétrica kWh/mês, pois para cada unidade de aumento na velocidade do vento ocorrerá uma diminuição no custo do investimento em R\$ 5.368,31 enquanto que o consumo aumenta o custo em R\$ 120,71.

Se o consumo for muito pequeno, por exemplo, menor ou igual a 179 kWh/mês para uma velocidade média do vento a 6m/s, na Equação 11 teremos um custo menor que R\$ 10.000,00, para casos como esse deve ser desconsiderado o custo estimado e admitir como R\$ 10.000,00, pois com base na pesquisa de mercado quanto aos preços, foi observado que o custo mínimo de investimento é de R\$ 10.000,00, por esta razão se faz necessário avaliar o tempo de retorno do investimento pois, em consumos muito pequenos pode não ser vantajoso o investimento.

4.1. APLICAÇÃO DO MODELO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DO CUSTO E DO TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO DE INSTALAÇÃO DE SISTEMA EÓLICO RESIDENCIAL

A seguir será feita uma análise por meio do modelo citado anteriormente, que é baseado no método de regressão linear múltipla, a fim de estimar o custo de instalação de um sistema eólico em uma residência (Equação 11).

Assim, de posse da fatura de energia elétrica da empresa COSERN referente à residência do cliente “BGR”, foram observados dois valores: a média de consumo igual a 252 kWh/mês e o consumo ativo de 0,38965733 kWh.

Substituindo na Equação 11 o consumo e a velocidade média do vento em 6m/s, tem-se que:

$$Custo = 20.602,42 + 120,71 * 252 - 5.368,31 * 6$$

$$Custo = R\$ 18.811,48$$

$$\text{isto é, } Custo = US\$ 4,949.92$$

Para verificar o tempo de retorno, devemos inicialmente calcular o valor da energia elétrica a ser quitada junto à empresa COSERN. Logo, devemos utilizar a equação 09 para calcular o preço final por kWh, para isso deve ser observado a taxa de impostos que incide no preço com base no consumo (ver Tabela 3).

$$- PF = \frac{0,38965733}{1-0,2365} = 0,510357$$

$$- \text{Valor da energia consumida} = 0,510357 * 252 = R\$ 128,6099$$

- A taxa de iluminação pública é de 11,44526% logo teremos:

$$128,6099 * 0,1144526 = R\$ 14,7197$$

$$- \text{Total da fatura} = R\$ 143,33$$

Uma vez instalado o sistema eólico para suprir a necessidade de energia elétrica, o cliente espera que não haja mais despesas junto à empresa fornecedora do serviço elétrico. Porém, a empresa cobra uma taxa de manutenção (TM) equivalente a 30 kWh/mês para residências monofásicas, de tal forma que essa taxa deve ser considerada para efeito da estimativa do tempo de retorno. Sendo assim, o preço final será igual a:

$$- PF = \frac{0,38965733}{1-0,0565} = 0,412991$$

$$- \text{Valor da energia consumida} = 0,412991 * 30 = R\$ 12,39$$

- A taxa de iluminação pública é de 11,44526% logo teremos:

$$12,39 * 0,1144526 = R\$ 1,42$$

- Total da fatura = R\$ 13,81 (Observação: Para residência monofásica onde foi instalado o sistema eólico.

Tabela 6: Tempo de retorno do investimento

Ano	Faturas a ser pagas R\$	Reajuste (%)	Acumulado R\$
ano 1	1.554,26	0	1.554,26
ano 2	1.678,60	8	3.232,87
ano 3	1.812,89	8	5.045,76
ano 4	1.957,92	8	7.003,68
ano 5	2.114,56	8	9.118,24
ano 6	2.283,72	8	11.401,96
ano 7	2.466,42	8	13.868,38
ano 8	2.663,73	8	16.532,11
ano 9	2.876,83	8	19.408,94
ano 10	3.106,98	8	22.515,92
ano 11	3.355,54	8	25.871,45
ano 12	3.623,98	8	29.495,43
ano 13	3.913,90	8	33.409,33
ano 14	4.227,01	8	37.636,33
ano 15	4.565,17	8	42.201,50
ano 16	4.930,38	8	47.131,88
ano 17	5.324,81	8	52.456,70
ano 18	5.750,80	8	58.207,49
ano 19	6.210,86	8	64.418,36
ano 20	6.707,73	8	71.126,09
Total	71.126,09		

Fonte: Autor

Na Tabela 6, pode ser observado que, para a situação citada no ano 9, o valor acumulado é superior ao valor do investimento inicial que foi de R\$ 18.811,48. Como os aerogeradores disponíveis no mercado possuem vida útil de vinte anos, restam ainda onze anos para o cliente usufruir do investimento que terá uma economia no orçamento familiar no valor de R\$ 51.717,16, para esses anos restantes.

No entanto, há casos em que não é vantajoso instalar o sistema eólico em virtude de baixo consumo, como no exemplo a seguir:

Para um consumo médio de 60 kWh/mês e o consumo ativo de 0,38965733 kWh.

Teremos um investimento mínimo inicial de R\$ 10.000,00, isto é, de US\$ 2,631.58.

$$- PF = \frac{0,38965733}{1-0,0565} = 0,412991$$

- Valor da energia consumida = $0,412991 * 60 = \text{R\$ } 24,7795$

- A taxa de iluminação pública é de 11,44526% logo teremos:

$$24,7795 * 0,1144526 = \text{R\$ } 2,8361$$

- Total da fatura = R\$ 27,62

A taxa de manutenção será:

Valor da energia consumida = $0,412991 * 30(\text{kWh/mês}) = \text{R\$ } 12,39$

- A taxa de iluminação pública é de 11,44526% logo teremos:

$$12,39 * 0,1144526 = \text{R\$ } 1,42$$

- Total da fatura = R\$ 13,81 (Taxa de manutenção).

Tabela 7: Tempo de retorno do investimento para consumo de 60 kWh/mês.

Ano	Faturas a ser pagas R\$	Reajuste (%)	Acumulado R\$
ano 1	165,69	0	165,69
ano 2	178,95	8	344,64
ano 3	193,26	8	537,91
ano 4	208,73	8	746,63
ano 5	225,42	8	972,06
ano 6	243,46	8	1.215,51
ano 7	262,93	8	1.478,45
ano 8	283,97	8	1.762,42
ano 9	306,69	8	2.069,11
ano 10	331,22	8	2.400,33
ano 11	357,72	8	2.758,05
ano 12	386,34	8	3.144,38
ano 13	417,24	8	3.561,63
ano 14	450,62	8	4.012,25
ano 15	486,67	8	4.498,92
ano 16	5.25,61	8	5.024,53
ano 17	567,66	8	5.592,19
ano 18	613,07	8	6.205,26

ano 19	662,11	8	6.867,37
ano 20	715,08	8	7.582,45
Total	7.582,45		

Fonte: Autor

Na Tabela 7, pode ser observado que, ao final do tempo de vida útil do aerogerador (vinte anos), teremos um total inferior ao valor inicial aplicado (R\$ 10.000,00); indicativo de que não é vantajoso economicamente. Logo, não se recomenda a instalação do sistema eólico. Vale ressaltar que este exemplo é o caso de uma situação extrema, pois o tempo de retorno poderá ser subjetivo, já que o cliente poderá encontrar aplicações com rentabilidade superior a taxa de reajuste da tarifa elétrica.

5. CONCLUSÃO

Com base na pesquisa de mercado, foi possível ajustar um modelo por meio da técnica de regressão linear múltipla para estimar o custo de instalação de um sistema eólico de pequeno porte para residência com baixo consumo de energia elétrica. O modelo se ajustado é composto pela variável dependente “custo” e as variáveis independentes: consumo médio mensal (kWh/mês) de energia elétrica velocidade do vento (m/s). O modelo se aplica de forma satisfatória para consumos no intervalo de 180 kWh/mês a 400 kWh/mês com base na velocidade média do vento de 6 m/s, pois o investimento mínimo é de R\$ 10.000,00 (US\$ 2,631.58) para consumo inferior a 180 kWh/mês, o modelo estimará um custo de investimento como sendo inferior a R\$ 10.000,00, embora o modelo apresente uma qualidade de ajuste em 96,83%. Para consumo acima de 400 kWh/mês, será necessário aerogerador de maior potência. Essa limitação no modelo para intervalo do consumo é atribuída à falta de mais opções de aerogeradores no mercado brasileiro.

A velocidade do vento é a principal variável que influencia no custo final do investimento. Portanto, para cada aumento em uma unidade na velocidade do vento, ocorrerá uma diminuição no investimento em R\$ 5.368,31 (US\$ 1,412.71), enquanto que o consumo de energia elétrica aumentará o custo do investimento em R\$ 120,71 (US\$ 31.77).

O custo de investimento na instalação do sistema eólico pode ser considerado vantajoso quando o tempo de retorno for inferior ao tempo de vida útil do aerogerador. Para o consumo médio mensal de energia elétrica residencial menor igual a 60 kWh/mês, não é viável devido ao tempo de retorno ser superior a vinte anos. A análise do tempo de retorno está sendo realizada somente do ponto de vista financeiro, pois como a energia elétrica influencia na qualidade de vida, dessa forma o retorno é imediato já que proporciona um conforto e qualidade de vida maior.

Embora por agora se encerre este estudo, tem-se certeza de que ele não se esgota aqui. Pretende-se realizar estudo similar voltado para sistema solar e para sistema híbrido (eólico/solar).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES et al. **Projeto de geração de energia eólica**. Santos, 2006. Disponível em: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/polari/energiaeolica-tcc.pdf>>. Acesso em: 01 março 2016.

ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída**. Brasília, 2014. Disponível em:< <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>>Acesso em: 01 março 2016.

BARBOSA, Diego; MELO, Emanuel ; CONTÍLIO, Vinícius. **Energia eólica: análise sobre o potencial eólico brasileiro**. Disponível em: <<http://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/viewFile/1830/1008>>Acesso em: 10 julho. 2015.

BRITO, Sérgio de Salvo. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. Rio de Janeiro,2008. Disponível em:< <http://www.portal-energia.com/downloads/energia-eolica-principios-tecnologias.pdf>>. Acesso em: 27 abril, 2016.

CERNE. **A indústria dos ventos e o Rio Grande do Norte Brasil**. Natal, 2014. Disponível em:<<http://cerne.org.br/pdfs/CartilhaEolicaCERNE2014.pdf>>. Acesso em: 05 maio, 2016.

CHARNET, Reinaldo Freire. **Análise de modelos de regressão linear com aplicações**. Unicamp Editora. Campinas, 2008. Acesso em: 05 maio, 2016.

DELGADO, F. M. **Viabilidade técnica/econômica para produção de energia eólica, em grande escala, no nordeste brasileiro**. Minas Gerais, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/4551/1/TCC%20-%20Energia%20E%20C%20B3lica%20-%20Fernando%20Delgado%20Moreira%20Junior%20-Carta%20-%20Final.pdf>>. Acesso em: 01 maio, 2016.

EPE, 2015. Disponível em:<<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 23 novembro. 2015.

ENERGIA PURA: DESDE 1993. **Energia Eólica abastece residência no Paraná**. Disponível em:<<https://www.energiapura.com/content/energia-e%20C%20B3lica-abastece-resid%20C%20AAno-no-paran%20C%20A1>>. Acesso em : 07 maio, 2016.

ENGEL, Tatiana; TOLFO, Denise. **Métodos de Pesquisa**. Rio Grande do Sul; 1 ed. 2009. Acesso em: 29 nov, 2015.

LOPES, Ricardo Aldabó. **Energia Eólica**. 2.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

MARQUES, Ricardo. **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/rmdutra.pdf>>. Acesso em : 14 março. 2016.

MARTINS, F.R; GUARNIERI, R.A; PEREIRA, E.B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. Vol. 30, nº1(2008). São Paulo. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/301304.pdf>>. Acesso em: 14 março. 2016.

OLIVEIRA, T.R. **Geração de energia x impacto ambiental**. Minas Gerais, 2011. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/119/46119628.pdf>. Acesso em: 21 maio. 2016.

PETERNELLI, Luiz. **Capítulo 6: Regressão linear e correlação**. 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.ufv.br/~peterneli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>>. Acesso em: 23 maio, 2016.

PETRY, Adriane Prisvo; MATTUELLA, Jussara M. Leite. **Análise do potencial eólico e estimativa da geração de energia empregando o “software” livre alwin**. Porto Alegre, 2007. Acesso em: 27 abril, 2016.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Decreto lei 10.438./2002** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/Ccivil_03/leis/2002/L10438.htm>. Acesso em: 14 julho. 2015.

SILVA, N. A. **Otimização de torre de aço para aerogerador eólico**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em : <<http://www.labbas.eng.uerj.br/pgeciv/nova/files/dissertacoes/73.pdf>>. Acesso em: 14 março. 2016.