



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

ERIALDO DE OLIVEIRA FEITOSA

**ENERGIA EÓLICA APLICADA AO BOMBEAMENTO DA ÁGUA PARA
IRRIGAÇÃO POR GRAVIDADE NA AGRICULTURA FAMILIAR**

**FORTALEZA
2014**

ERIALDO DE OLIVEIRA FEITOSA

ENERGIA EÓLICA APLICADA AO BOMBEAMENTO DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO
POR GRAVIDADE NA AGRICULTURA FAMILIAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Albiero.

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alessandro Chioderoli.

FORTALEZA
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- F336e Feitosa, Erialdo de Oliveira.
 Energia eólica aplicada ao bombeamento da água para irrigação por gravidade na agricultura familiar / Erialdo de Oliveira Feitosa. – 2014.
 106 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2014.
 Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.
 Orientação: Prof. Dr. Daniel Albiero.
 Coorientação: Prof. Dr. Carlos Alessandro Chioderoli.
1. Energia renovável. 2. Turbinas eólicas. 3. Energia eólica. 4. Agricultura familiar. I. Título.

ERIALDO DE OLIVEIRA FEITOSA

ENERGIA EÓLICA APLICADA AO BOMBEAMENTO DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO
POR GRAVIDADE NA AGRICULTURA FAMILIAR

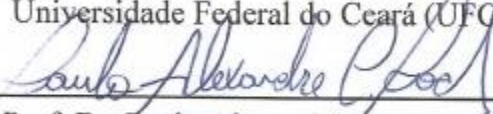
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Aprovada em 26 / 09 / 2014.

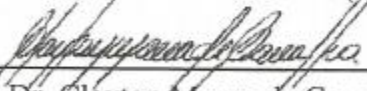
BANCA EXAMINADORA



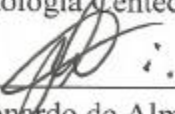
Prof. Dr. Daniel Albiero (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Clayton Moura de Carvalho
Faculdade de Tecnologia Centec (FATEC- CARIRI)



Prof. Dr. Leonardo de Almeida Monteiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*Aos meus pais, Leandro de Oliveira Feitosa e
Joana Simão da Silva Feitosa, e a todos os
meus irmãos.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me proporcionar mais uma realização na minha vida, me concedendo coragem, e graça para tudo eu vencer com discernimento e sabedoria.

À Universidade Federal do Ceará, em particular ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade oferecida à realização do curso de Mestrado em Engenharia Agrícola.

Ao Professor Dr. Daniel Albiero, pelo apoio, amizade, orientação e dedicação a mim oferecido durante essa caminhada.

Aos meus pais, Leandro de Oliveira Feitosa e Joana Simão da Silva Feitosa, pelo apoio, confiança e dedicação.

Aos meus irmãos: Hernandes, Eraldo, Janaina, Edinho, Everaldo, Patrícia, Simone, Evaldo, Jessica e Edson pelo apoio, carinho, incentivo e compreensão.

Aos professores, Carlos Alessandro Chioderoli, Leonardo de Almeida Monteiro, Clayton Moura de Carvalho, Paulo Alexandre Costa Rocha, pela contribuição ao trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo.

À empresa Brasil Wind Service, em nome do gerente comercial Wilmar Pereira, pelo suporte no desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Dr. Wladimir Ronald Lobo Farias, pelo espaço cedido para a condução do experimento.

Ao Professor Dr. Paulo Cesar Marques Carvalho pela parceria, e por ter cedido o aerogerador para realização do experimento.

Aos bolsistas do grupo de pesquisa do GEMASA: Ronaldo, Rafaela, Aline, Flávio, Heldenir, pelo apoio e amizade na realização deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, Maurício e Ana, pela amizade.

Ao secretário da Pós graduação Manoel Jacó, pela amizade e presteza de seus serviços prestados.

Aos amigos de curso do Departamento de Engenharia Agrícola pela amizade, e convivência.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

FEITOSA, Erialdo de Oliveira, Universidade Federal do Ceará. Setembro de 2014. **Energia eólica aplicada ao bombeamento da água para irrigação por gravidade na agricultura familiar.** Orientador: Daniel Albiero. Co-orientador: Carlos Alessandro Chioderoli. Conselheiros: Leonardo de Almeida Monteiro, Clayton Moura de Carvalho, Paulo Alexandre Costa Rocha.

O uso da energia eólica é hoje uma realidade no contexto energético brasileiro, pois atende o requisito de complementaridade ao sistema nacional de energia e sua exploração gera relativamente poucos impactos ambientais. Neste contexto a agricultura familiar que convive com semiárido passa por grandes gargalos com relação ao acesso, e o custo de dois recursos fundamentais para o seu desenvolvimento, água e energia. Este projeto foi desenvolvido com viés no fornecimento de água e energia para pequenas propriedades rurais focadas em hortículas. De modo que a energia eólica possa ser uma solução importante para o processo de produção da agricultura, pois pode suprir as necessidades do pequeno produtor. Assim o objetivo desta pesquisa foi verificar um aerogerador na geração de energia elétrica para acionamento de um sistema de bombeamento de água, o qual realizava o recalque da água para um reservatório elevado, e que possa ser utilizado na irrigação por gotejamento gravitacional. Utilizou-se um aerogerador de 1 kW de potência, modelo H3.1-1KW, marca Hummer, onde o mesmo e o sistema de bombeamento foram instalados na Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici. Com o arranjo experimental pronto, foi efetuada a coleta de dados da velocidade do vento, corrente e tensão do aerogerador, e pressão e vazão do conjunto motobomba. Como resultado verificou-se o volume bombeado em média de 3.750,5 L dia⁻¹. Concluindo que o mesmo pode ser usado na produção irrigada de hortículas da agricultura familiar e também seria útil na produção animal e próprio consumo. Enfim a energia eólica apresenta-se como uma boa alternativa para o agricultor familiar conviver com o semiárido, no sentido que possibilitará o uso de energia renovável atrelada ao uso racional da água.

Palavras - chave: Energia renovável. Potencial eólico. Turbina eólica.

ABSTRACT

FEITOSA, Erialdo de Oliveira, Universidade Federal do Ceará. September 2014. **Wind power applied to the pumping of water for irrigation by gravity in family agriculture.**

Advisor: Daniel Albiero. Advisors: Carlos Alessandro Chioderoli, Leonardo de Almeida Monteiro, Clayton Moura de Carvalho, Paulo Alexandre Costa Rocha.

The use of wind energy is today a reality in the Brazilian energetic context, because it meets the requirement of complementarity to the national energy system and its exploitation generates relatively few environmental impacts. In this context family agriculture, which lives together with semiarid, passes per great bottlenecks with relation to the access, and the cost of two resources fundamental for its development, water and energy. This project was developed with bias in the supply of water and energy to small rural properties focused on horticultural. So that wind energy can be an important solution for the process of production of agriculture, because it can supply the needs of the small producer. Thus the objective of this research was to investigate the possibility of a wind turbine to generate electricity to put in action an water pumping system which represses water to an elevated reservoir, and possibly could be used for irrigation per gravity drip. It was used a 1 kW wind generator power, model H3.1-1KW, Hummer mark, where it and the pumping system were installed at the Federal University of Ceará, Campus do Pici. With the experimental arrangement ready, it was conducted to collect data on wind speed, current and voltage generated by, and pressure and flow rate of the motor pump. As a result it was verified a pumped volume averaged $3750.5 \text{ L day}^{-1}$. Concluding that can be used in irrigated horticultural production family agriculture and would also be useful in animal production and consumption own. This conclusion presents wind power as a good alternative for family agriculture live with the semiarid in the sense which will enable the use of renewable energy linked the rational use of water.

Keywords: Renewable energy. Wind potential. Wind turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira	19
Figura 2 - Capacidade instalada no mundo e o crescimento percentual por ano	23
Figura 3 - Evolução da capacidade instalada e previsão de crescimento no Brasil	25
Figura 4 - Potencial eólico Brasileiro por regiões e o total	27
Figura 5 - Potencial eólico do Brasil, Nordeste, e Ceará.....	28
Figura 6 - Aerogerador de eixo horizontal	33
Figura 7 - Aerogerador de eixo vertical.....	33
Figura 8 - Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica	38
Figura 9 - Local de instalação do experimento no Campus do Pici - UFC	44
Figura 10 - Conjunto motobomba utilizado no experimento	46
Figura 11 - Gráfico do desempenho da bomba utilizada no experimento.....	47
Figura 12 - Estrutura com o reservatório elevado	48
Figura 13 - Sistema hidráulico da unidade de bombeamento	49
Figura 14 - Banco de baterias do sistema eólico-elétrico.....	49
Figura 15 - Inversor utilizado no experimento (A) e a tensão de saída (B)	50
Figura 16 - Inversor de frequência indicando baterias carregadas	51
Figura 17 - Anemômetro de conchas utilizado no experimento.....	52
Figura 18 - Datalogger utilizado no experimento.....	53
Figura 19 - Alicates amperímetro digital	54
Figura 20 - Curvas características de operação para diferentes valores de n para o teste em frente e verso normal para um nível de significância $\alpha = 0,05$	58
Figura 21 - Velocidade média diária do vento durante os dias de avaliação	66
Figura 22 - Velocidade média do vento de funcionamento.....	67
Figura 23 - Comportamento diurno da velocidade média do vento	69
Figura 24 - Análise de resíduos da velocidade versus horário	70
Figura 25 - Velocidades médias de acionamento do sistema de bombeamento.....	71
Figura 26 - Histograma de frequência relativa da velocidade do vento medida	72
Figura 27 - Curva de potência do aerogerador em função da velocidade do vento	75
Figura 28 - Análise de resíduos da potência versus velocidade	76
Figura 29 - Gráfico de tensão do aerogerador em função da velocidade do vento	76
Figura 30 - Análise de resíduos da tensão versus velocidade	77

Figura 31 - Curva da corrente do aerogerador em função da velocidade do vento.....	78
Figura 32 - Análise de resíduos da corrente versus velocidade.....	78
Figura 33 - Comparação da curva de potência calculada versus fabricante.....	79
Figura 34 - Curvas de potência, tensão e corrente em função da velocidade do vento.....	80
Figura 35 - Volume de água bombeado em função da velocidade média do vento	83
Figura 36 - Gráfico adimensional dos P_{i-1} x P_{i-2} para o experimento	86
Figura 37 - Tela inicial do software Retscreen.....	88
Figura 38 - Condições de referência para o local em estudo.....	89
Figura 39 - Modelo energético do caso proposto, produção de eletricidade.....	90
Figura 40 - Modelo energético do caso proposto, análise financeira	91
Figura 41 - Fluxo de caixa cumulativo do projeto	93
Figura 42 - Fluxo de caixa cumulativo o aerogerador na velocidade nominal	94

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Especificações técnicas do aerogerador da HUMMER H3.1-1KW.....	45
Tabela 2 - Dados do conjunto motobomba utilizado.....	46
Tabela 3 - Matriz dimensional do experimento.....	60
Tabela 4 - Matriz dimensional característica do experimento.....	60
Tabela 5 - Matriz solução dos PI-termos.....	61
Tabela 6 - Estatística descritiva da velocidade do vento apartir dos dados medidos	64
Tabela 7 - Análise de variância da velocidade do vento	65
Tabela 8 - Estatística descritiva básica dos valores de potência.....	73
Tabela 9 - Análise de variância da potência	74
Tabela 10 - Estatística descritiva básica dos valores de vazão do sistema.....	81
Tabela 11 - Análise de variância da vazão do sistema de bombeamento	82
Tabela 12 - Estatística descritiva básica dos valores de pressão do sistema hidráulico	84
Tabela 13 - Análise de variância da pressão hidráulica do sistema de bombeamento	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	HIPÓTESE	16
3	OBJETIVO GERAL.....	17
3.1	Objetivos específicos	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
4.1	Energias renováveis e o meio ambiente.....	18
4.2	Energia eólica	20
4.2.1	Histórico.....	21
4.2.2	Energia eólica no mundo.....	22
4.2.3	Energia eólica no brasil.....	23
4.2.4	Energia eólica no ceará	26
4.3	Importância da energia eólica para o desenvolvimento sustentável	29
4.4	Aerogeradores de pequeno porte	30
4.4.1	Aerogerador de eixo horizontal.....	32
4.4.2	Aerogerador de eixo vertical	34
4.5	Distribuição e frequência probabilística do vento.....	35
4.6	Energia eólica e irrigação	36
4.7	Agricultura familiar e irrigação	39
4.8	Análise dimensional	41
4.9	Viabilidade econômica	42
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	43
5.1	Localização da área do experimento	44
5.2	Descrição do sistema	44
5.2.1	Aerogerador.....	45
5.2.2	Conjunto motobomba.....	46
5.2.3	Reservatório elevado	47
5.2.4	Banco de baterias	49
5.2.5	Inversor de frequência.....	50
5.2.6	Anemômetro de conchas	51
5.2.7	Alicate amperímetro digital.....	53
5.3	Metodologias de avaliação de turbinas eólicas	54

5.3.1	Medições da velocidade do vento	54
5.3.2	Metodologias estatísticas da função de distribuição	55
5.3.3	Potência extraída do vento	56
5.4	Planejamento estatístico	57
5.5	Análise dimensional	59
5.6	Viabilidade econômica	62
5.7	Metodologia estatística.....	62
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
6.1	Velocidade do vento	64
6.1.1	Distribuição da velocidade do vento	68
6.2	Curva de potência do aerogerador	73
6.3	Volume de água bombeado	81
6.4	Pressão hidráulica do sistema	84
6.5	Análise dimensional	85
6.6	Viabilidade econômica	87
7.	CONCLUSÃO	96
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia eólica está em constante crescimento nos últimos anos, devido a vários fatores, dentre os quais pode-se destacar a diminuição dos custos dos aerogeradores aliado à disseminação da tecnologia, o melhoramento da eficiência das turbinas eólicas, e particularmente à procura por fontes energéticas limpas e renováveis, cuja exploração resulte em pequenos impactos ambientais, e se constitua em uma ferramenta viável para agricultura familiar.

A agricultura familiar com o uso da tecnologia da irrigação de baixo custo busca o desenvolvimento e a evolução dos processos agrícolas, porém há um aumento na necessidade de bombeamento de água, e conseqüentemente de energia necessária para acionar o sistema. Portanto, há a necessidade de averiguar novas alternativas para diminuir os custos, e que possibilitem fornecimento de energia para acionamento do conjunto motobomba no transporte de água para irrigação ou abastecimento de água para pequenas comunidades.

Um dos grandes gargalos da agricultura familiar nas regiões semiáridas do Nordeste Brasileiro é a dificuldade de se produzir alimentos com o uso de dispositivos satisfatórios a obtenção dos recursos hídrico e energético, em que possa atender às necessidades básicas atuais e futuras sem contribuir para a exaustão dos recursos naturais. No entanto, estudos sobre o Nordeste mostraram que o setor econômico mais afetado pelas secas é a agricultura, especialmente o setor de subsistência, normalmente voltado para a produção de alimentos pela agricultura familiar.

As turbinas eólicas atuais no mercado apresentam bom desempenho na geração de energia elétrica a velocidade média do vento superior a 8 m s^{-1} , porém nas regiões onde estão localizados o maior percentual da agricultura familiar, não há essas mesmas condições de velocidades do vento. No entanto, há potencial eólico suficiente para geração de energia elétrica a ser utilizada no processo produtivo da agricultura familiar com uso da irrigação, e também estudos com a utilização de energia sustentável para a agricultura familiar ainda são poucos na literatura, surgindo à preocupação da análise da interação entre a tecnologia do bombeamento de água para a irrigação e a tecnologia de aerogeradores no processo de geração de energia elétrica para acionamento do sistema.

Portanto, o aproveitamento da energia eólica é de vital importância para o processo de produção da agricultura, pois pode suprir as necessidades de populações de pequeno porte, pequenas e médias propriedades, deixando a demanda maior de energia em

função das fontes convencionais. Assim, a fonte de energia eólica poderá dar maior suporte no desenvolvimento da agricultura familiar no Estado do Ceará.

O trabalho em questão refere-se à interação entre duas tecnologias: o bombeamento de água para a irrigação e aerogeradores para geração de energia elétrica, em que foi avaliado o acionamento do sistema hidráulico através da turbina eólica. Essa pesquisa foi realizada, primeiramente, mediante estudo sobre tecnologias de bombeamento de água usando a energia eólica e em seguida, realizada em campo uma validação experimental do sistema, onde foi instalado o sistema de bombeamento de água alimentado pelo aerogerador, e por fim efetuadas coletas de dados referentes à velocidade do vento, corrente e voltagem do aerogerador, vazão e pressão do sistema hidráulico.

2 HIPÓTESE

Há potencial eólico suficiente em baixas condições de vento para geração de energia elétrica a ser utilizada no acionamento do sistema de bombeamento de água, e com relação à utilização do reservatório elevado há flexibilidade na gestão do sistema, tanto para resistir às circunstâncias adversas como para potencializar as condições favoráveis.

3 OBJETIVO GERAL

Verificar um aerogerador na geração de energia elétrica para acionamento de um sistema de bombeamento o qual realizava o recalque da água para um reservatório elevado, e seja utilizado na irrigação por gotejamento gravitacional.

3.1 Objetivos específicos

- 1 - Analisar o acionamento do sistema de bombeamento por uma turbina eólica de pequeno porte;
- 2 - Analisar a vazão de água bombeada pelo sistema de bombeamento acionado pelo aerogerador;
- 3 - Avaliar a viabilidade da produção de energia elétrica, a partir de uma matriz eólica, para as condições da agricultura familiar;
- 4 - Proporcionar uma redução nos custos da produção agrícola.

4 REVISÃO DE LITERATURA

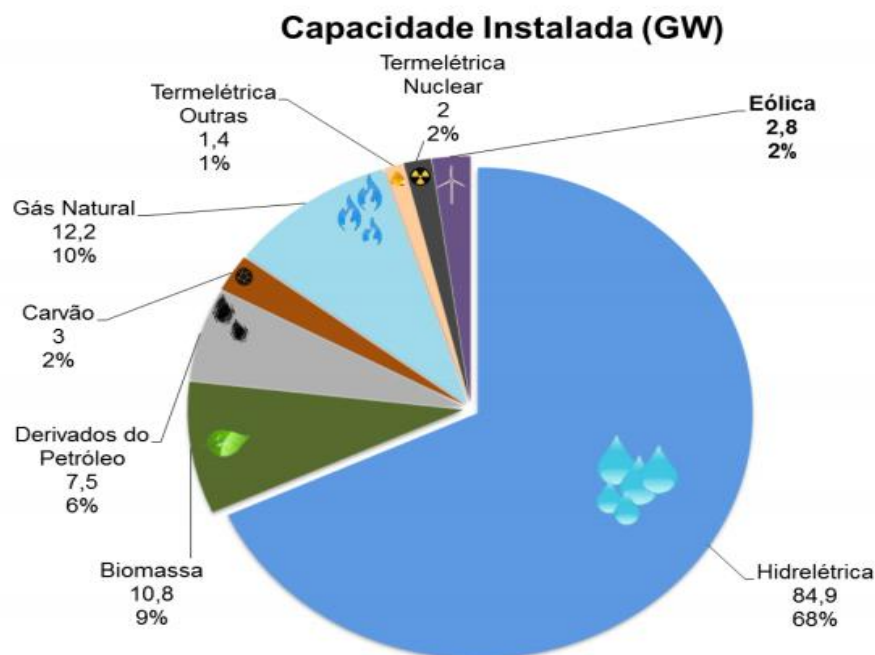
A energia elétrica em todas as suas formas sempre esteve presente no cotidiano do ser humano e sempre foi aspecto contribuinte para evolução, desenvolvimento, produção e fixação do homem junto aos recursos naturais necessários a sua sobrevivência (SOBRAL, 2009). Nesse sentido, o aproveitamento da energia eólica como alternativa para geração de energia elétrica para demandas energéticas da agricultura irrigada é de fundamental importância para o aumento da produção das culturas irrigadas cultivadas pelo produtor.

No entanto, a energia sempre foi fator essencial para a evolução e desenvolvimento da humanidade, tanto que a preocupação para a obtenção de fontes energéticas tem sido uma constante ao longo de sua história, em que o ser humano passou por diversos períodos nos quais dominaram matrizes energéticas diferentes, como a biomassa (lenha), o carvão e o petróleo. Atualmente são buscadas novas alternativas, estimuladas, sobretudo, em virtude da crise energética e do prejuízo ambiental causado pela queima dos combustíveis fósseis. (LEÃO FILHO, 2007).

4.1 Energias renováveis e o meio ambiente

O Brasil possui grande potencial de geração de energia elétrica, principalmente a partir de fontes renováveis, sendo que este elevado potencial está distribuído em diversas fontes como a hídrica, a eólica, a biomassa e a solar são algumas das mais conhecidas. Porém, com as mudanças climáticas e restrições a emissões de gases cada vez maiores, é importante a busca pelo desenvolvimento de economia de baixo carbono. Nesse sentido, é essencial valorizar as fontes renováveis de geração de energia elétrica que não adicionam emissões, e explorá-las de forma crescente e em harmonia com o meio ambiente. (PIRES; HOTZ, 2011).

No Brasil existe uma condição bastante favorável no que se refere à produção de energia elétrica por fontes limpas, apresentadas na Figura 1, sendo que aproximadamente 80% são provenientes de fontes renováveis, destaque para a hidrelétrica que corresponde a 68% da capacidade instalada, e a eólica que vem crescendo nos últimos anos, contribuindo com 2% da produção de energia elétrica.

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira

Fonte: Aneel/ABEEólica (2013).

As fontes de energias renováveis constituem um grande avanço no caminho da sustentabilidade energética, essas energias citadas compõem a potencialidade de uma localidade qualquer no globo para processar recursos no atendimento ao desenvolvimento da necessidade local, sendo a capacidade de processar essa energia de forma a aproveitá-la sem exauri-la ou causar danos ao ambiente, determinaram a sustentabilidade (SOBRAL, 2009).

Segundo Inatome (2005) e Martins (2007), faz-se necessário a utilização de outros métodos para geração de energia, ou seja, a utilização das fontes renováveis de energia que impactem o mínimo possível no meio ambiente, visando à busca da sustentabilidade e a diminuição do impacto decorrente do seu consumo.

O Brasil, no contexto mundial do desenvolvimento de energias renováveis, ampliou significativamente a participação da geração eólica na sua matriz elétrica como consequência de políticas específicas para o setor. Em 2004, existiam no Brasil 28,6 MW de projetos eólicos em operação, dos quais 26,5 MW em produção comercial eram projetos de pequeno porte e caráter experimental, em virtude do contexto político do setor elétrico brasileiro na época (DUTRA, 2007).

Porrua *et al.* (2010) destacar que as novas fontes renováveis candidatas a complementar a expansão da geração elétrica baseada na construção de grandes hidrelétricas,

são as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), ou seja, usinas hidrelétricas com capacidade instalada de até 30 MW e área de reservatório menor que 3 km², parques eólicos, sistemas solares e usinas termelétricas de biomassa (especialmente cogeração usando o bagaço de cana de açúcar).

Em meio às aplicações no que diz respeito à geração de energia renovável, o bombeamento d'água surge como algo de fundamental importância para uso humano, animal ou para irrigação em meios rurais devido a sua caracterização como energia “limpa”, com isso não afetando o meio ambiente, e que a presença de vento em quantidade satisfatória nestes locais, a energia eólica surge como solução técnica e econômica para essas situações (PRESENÇO, 2007).

A presença de projetos de energias renováveis em áreas rurais, principalmente áreas que carecem de desenvolvimento econômico, pode trazer diversos benefícios para a comunidade, como características socioeconômicas de muitas regiões, especificamente áreas rurais, tornando vantajoso o investimento em tecnologias de energias renováveis (RÍO; BURGUILLO, 2008).

A energia eólica tem ganhado bastante destaque no cenário mundial por ser uma fonte de energia limpa e renovável que pode ajudar a reverter o quadro atual de mudanças climáticas e ser dentre as fontes alternativas de geração elétrica a que tem apresentado os custos mais competitivos com fontes convencionais de energia baseadas em combustíveis fósseis (WWEA, 2009).

4.2 Energia eólica

A energia eólica consiste na conversão da energia cinética de uma massa de ar em movimento em energia mecânica. Esta é gerada pela rotação das pás em torno de um eixo, que, por meio de um gerador elétrico, converte a mesma em energia elétrica. (CARVALHO, 2003).

A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares. A utilização desta fonte energética para a geração de energia elétrica em escala comercial teve início há pouco mais de 30 anos e através de conhecimentos da indústria aeronáutica os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de ideias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia (SANTOS, 2005).

O uso dessa fonte de energia renovável tem grande destaque por se tratar de uma geração livre de emissões de gases e de custos de implantação progressivamente baixos. Entretanto, tem a desvantagem relacionada com a instabilidade dos ventos, o que traz incerteza na determinação da energia que é gerada (LANGARO; BALBINO, 2008).

4.2.1 Histórico

Os primeiros registros oficiais do uso da energia eólica para utilização na agricultura foram na Pérsia, aproximadamente 200 a.C., no entanto, há fortes indícios dessa utilização na China 2000 a.C., e pelo Império Babilônico 1700 a.C., com cataventos primitivos para a irrigação. A introdução dos cataventos na Europa ocorreu durante as Cruzadas, por volta de 1000 d.C., e os cataventos verticais pérsios foram utilizados até o século XII quando foram introduzidos moinhos com eixo horizontal, sendo a Holanda, França e Inglaterra os países a utilizarem esta tecnologia que foi rapidamente disseminada por vários outros países, que com o avanço tecnológico, o uso dos moinhos de vento trouxe a melhoria de várias atividades agrícolas, nas quais a força motriz era o vento (TOLMASQUIM, 2004).

A energia eólica tem sido usada a milhares de anos, em diversas aplicações, como moagem de grãos e bombeamento de água, mas a sua utilização para geração de energia elétrica tem sido feita desde o final do século XIX, quando pequenas máquinas eólicas foram desenvolvidas para carregar baterias (CRESESB, 2006).

Com o crescimento do consumo de energia elétrica no final do século XIX, surgiram as primeiras experiências através da energia eólica para geração de eletricidade. Entretanto, somente na década de 1970, com a crise internacional do petróleo que houve realmente a necessidade de elaborar alternativas para produção de energia elétrica e aperfeiçoamento que viabilizassem a aplicação de equipamentos a nível mundial. (ALVES, 2010).

Segundo Martins (2011), no Brasil a primeira turbina foi instalada em 1992 em Fernando de Noronha (PE), constituída de um gerador de 75 kW, rotor de 17 m e torre de 23 m, essa turbina fornecia 10% da energia consumida na ilha, gerando uma economia de aproximadamente 70.000 litros de óleo diesel por ano, e em 2001, através de um estudo de medições de ventos ao longo de todo o território brasileiro, realizado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica e publicado como Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, estimou o potencial eólico em 143 GW (CEPEL, 2001).

É importante lembrar que a região Nordeste foi pioneira na instalação de energia eólica para aproveitamento na geração de energia elétrica no país. Os parques eólicos já em operação são a prova de que a iniciativa das empresas brasileiras responsáveis pelos experimentos e das empresas produtoras de energia que atuam neste setor elétrico, investem em recursos para o aproveitamento de energia elétrica por meio de turbinas eólicas. No campo de atuação brasileiro, a presença dos autoprodutores e dos produtores independentes são de participação importante na expansão do setor de energia eólica e na matriz de sustentabilidade energética (ALVES, 2010).

4.2.2 Energia eólica no mundo

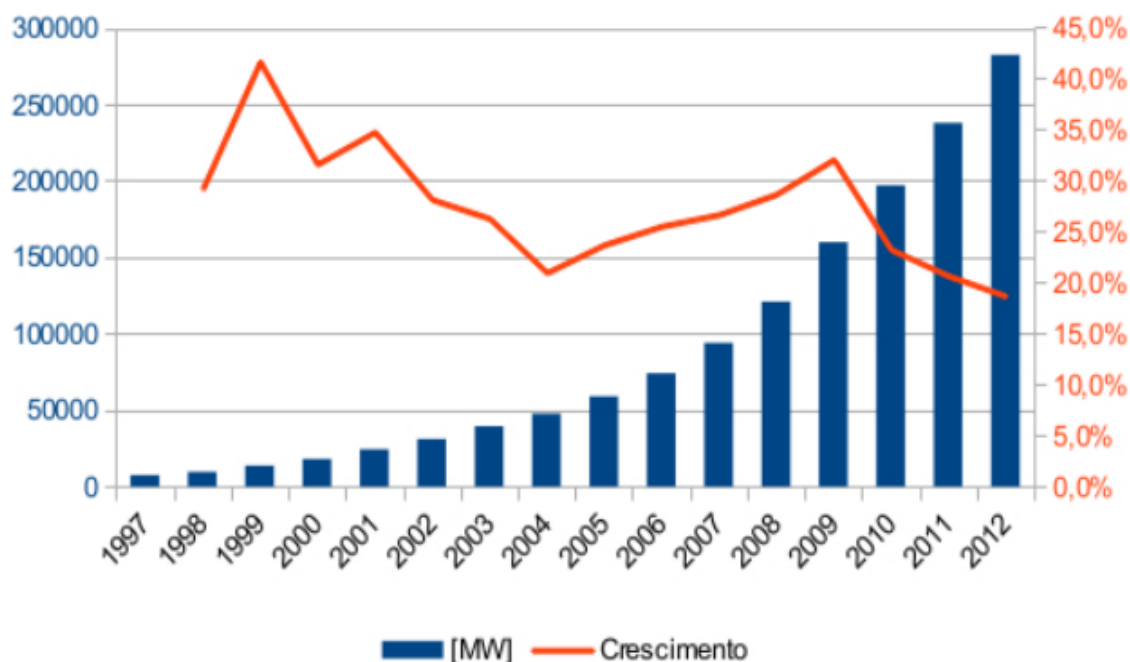
Tolmasquim (2004), o mercado energético mundial passou por grandes transformações principalmente após os choques do petróleo na década de 70. A geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas, até então, era um mercado obsoleto e voltado para a pesquisa e desenvolvimento. A partir dos choques, novos estudos e projetos foram desenvolvidos no sentido de ampliar o mercado para o fortalecimento do setor eólico industrial. Após os choques e principalmente nas décadas de 80 e 90, a indústria eólica mundial cresceu significativamente no amadurecimento de suas tecnologias e também na procura de novos mercados.

A busca por fontes de energia mais baratas, bem como a crescente pressão por busca de fontes de energia menos poluentes, fez com que a energia eólica voltasse aos holofotes nas últimas duas décadas, sendo observada uma revolução no setor (ALVAREZ, 2013).

Segundo dados da associação mundial de energia eólica (World Wind Energy Association - WWEA, 2013), o mundo possuía no final de 2012 uma capacidade instalada de 282 GW, o que representa aproximadamente 3% da demanda mundial de energia, conforme a Figura 2, em que se chega à histórica marca de 100 países produzindo energia eólica. Essa capacidade instalada representa mais de duas vezes a capacidade elétrica instalada no Brasil.

Conforme apresentado na Figura 2, o mundo vem observando ano a ano uma taxa de crescimento no fornecimento de energia de origem eólica acima de 20%, mas em alguns países, esse crescimento é ainda maior.

Figura 2 - Capacidade instalada no mundo e o crescimento percentual por ano



Fonte: WWEA (2013).

A potência instalada de energia eólica dos três maiores produtores China, Estados Unidos e Alemanha, equivalem a praticamente toda a capacidade de geração elétrica do Brasil. E mais, a China, somente no primeiro semestre de 2012, adicionou ao seu parque eólico o equivalente a quase o triplo do parque eólico brasileiro, e os Estados Unidos, mais do que um parque eólico brasileiro (ALVAREZ, 2013).

Os aerogeradores e demais componentes eólicos são fabricados em vários países do mundo. As bases das indústrias de fabricação dos aerogeradores são a Dinamarca, Alemanha, Espanha, Estados Unidos, Índia e China. Embora a produção em massa tenha começado na Europa, a demanda global por tecnologia gerou um mercado produtor em outros países. (Global Wind Energy Council – GWEC, 2008).

4.2.3 Energia eólica no Brasil

O Brasil foi o país pioneiro na América Latina a instalar um aerogerador no início da década de 1990. Este projeto foi resultado de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE, e a Companhia Energética de Pernambuco - CELPE, por meio de financiamento do instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter. A turbina eólica de 75 kW foi instalada em Pernambuco em 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha, chegou a

gerar 10% da energia elétrica consumida na ilha, economizando 70.000 litros de diesel por ano. Alguns outros projetos, muitos deles experimentais, foram realizados nos anos seguintes, nos Estados de Minas Gerais, Ceará, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Paraná e Santa Catarina (CBEE, 2013).

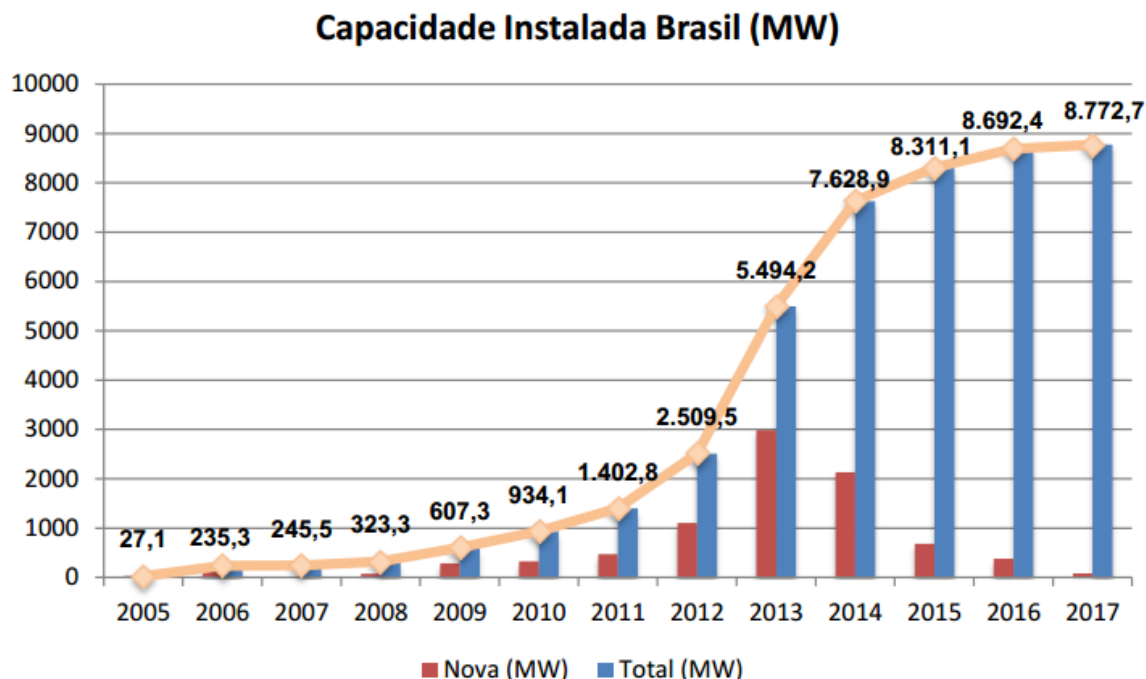
O Brasil possui potencial eólico de 144 GW para aerogeradores instalados a uma altura de 50 m (AMARANTE *et al.*, 2001), porém, estimativas mais recentes, de 2012, mostram que o país possui um potencial onshore de 350 GW para uma altura de 80 m a 100 m (GWEC, 2013). No entanto, quando se trata do potencial offshore, ou seja, aerogeradores instalados na água, o estudo de (ORTIZ; KAMPEL, 2011) mostra que o potencial brasileiro na sua zona de exploração exclusiva (ZEE) é da ordem de 1.780 GW, sendo 606 GW para águas com profundidade variando entre 0 m a 100 m e altura de 80 m.

A tecnologia de geração eólica já se encontra bastante desenvolvida e madura no mercado internacional, mas será necessário adaptá-las e rapidamente desenvolver procedimentos para poder prever o comportamento da geração eólica e inseri-la na operação do sistema interligado nacional (CRESESB, 2013).

Já Cerqueira (2013), acrescenta que um dos benefícios da inserção da geração dessa energia no parque gerador brasileiro decorre do fato que essa energia venha complementar à geração hidrelétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). Logo, a complementaridade pode contribuir para aumentar a segurança do abastecimento energético, principalmente na região Nordeste, pelas condições climáticas favoráveis.

Além desse enorme potencial inexplorado, Dutra e Szklo (2008) destacam que a integração da energia eólica na matriz elétrica brasileira apresenta uma série de vantagens quando comparada com as fontes convencionais de geração, contribuindo para a diversificação da matriz elétrica, predominantemente hidráulica (70% da capacidade instalada), o que ajuda a reduzir o uso de usinas termoelétricas movidas a combustíveis fósseis, reduzindo também o risco geopolítico relacionado ao acesso do gás natural no Brasil.

Diante desse potencial para a geração de energia elétrica provinda da fonte eólica, a Figura 3 demonstra a evolução da capacidade instalada da fonte eólica no Brasil, e a previsão de crescimento em função das contratações já realizadas nos leilões regulados e no mercado livre.

Figura 3 - Evolução da capacidade instalada e previsão de crescimento no Brasil

Fonte: Aneel/ABEEólica, (2013).

A energia eólica vem fortalecendo sua participação na matriz energética nacional, principalmente depois do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas) que previa a instalação de 1.422 MW divididos em 54 usinas eólicas com garantia de contrato de fornecimento com a Eletrobrás por 20 anos (CALDAS, 2010). Dessa maneira por meio do PROINFA, o Ministério de Minas e Energia (MME) buscou uma diversificação da matriz energética do país. Além disso, a geração distribuída aumenta a segurança do abastecimento da energia elétrica, economiza investimentos em transmissão e reduz as perdas nesses sistemas, e por fim, com o incentivo às fontes alternativas as características e potencialidades regionais e locais são valorizadas (BANDEIRA JUNIOR, 2010).

Após ser o país pioneiro na instalação de empreendimentos eólicos na América Latina e de implementar políticas de incentivo a esta tecnologia no continente, o Brasil teve grande crescimento no volume de projetos eólicos contratados a partir de 2009, e se tornou o mercado mais atrativos no continente latino-americano. Em 2011, o mercado eólico brasileiro foi considerado o 9º melhor mercado mundial para investimentos, e em 2012 foi o 11º produtor mundial de energia eólica com relação à produção de 2011, e o crescimento apresentado em 2012 (ALVAREZ, 2013).

4.2.4 Energia eólica no Ceará

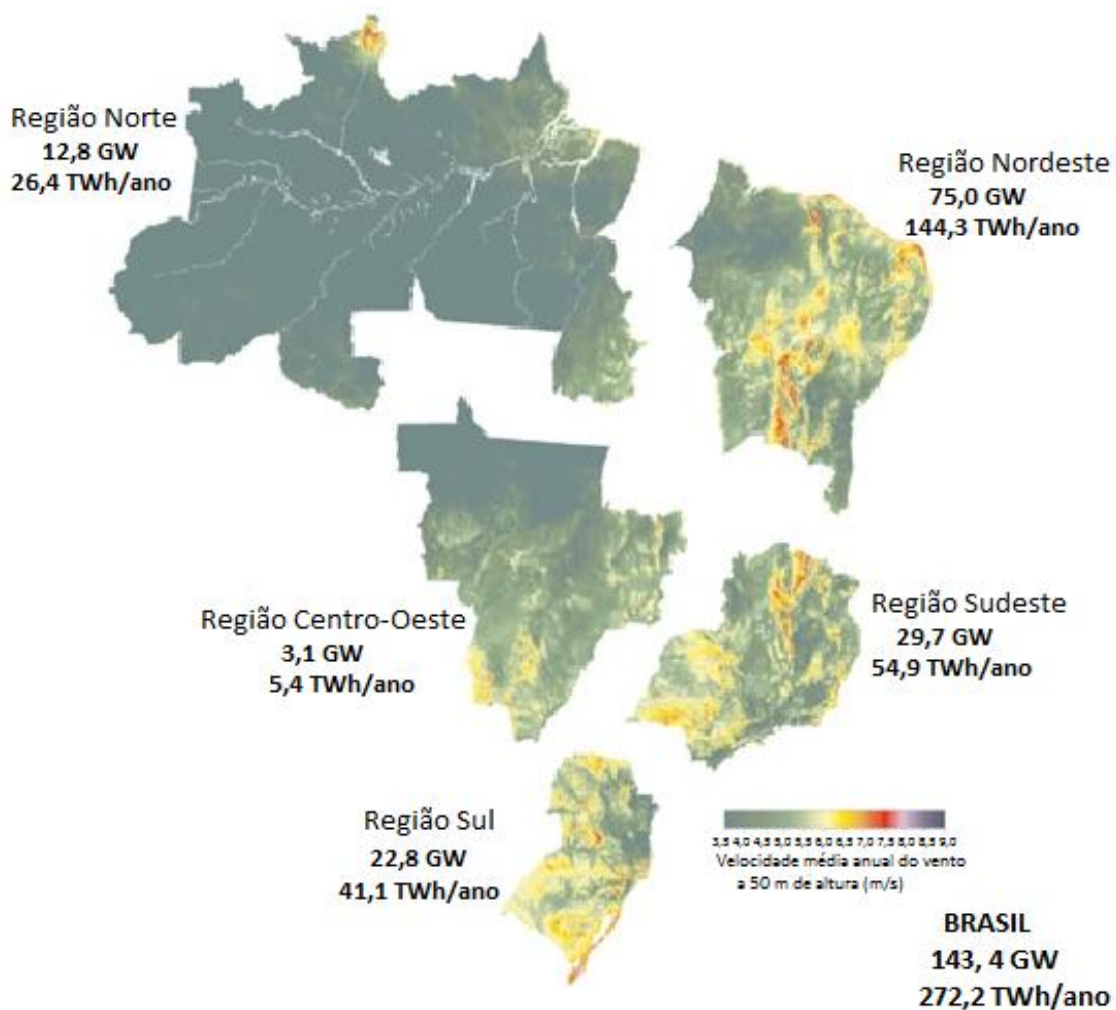
O Estado do Ceará começou a explorar a energia proveniente dos ventos em 1990, quando foi realizado estudo para levantar e analisar a possibilidade de implantação e desenvolvimento de parques eólicos no projeto “Mapeamento Eólico do Estado do Ceará”, sendo possível graças a um Protocolo de Intenções firmado entre a Companhia de Eletricidade do Ceará – COELCE e a Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit - GTZ (LAGE; BARBIERI, 2002),

A energia eólica assume especial importância na região Nordeste brasileira. Não só por ser considerada como das mais privilegiadas do Mundo em recursos eólicos, como também por sua complementaridade com a energia proveniente das hidroelétricas, pois a estação do ano mais seca (junho a dezembro) coincide com a de maior potencial eólico, permitindo uma gestão mais eficiente do nível das águas nas represas, permitindo poupar os níveis dos reservatórios em épocas de pouca chuva (ANEEL, 2008).

Porrúa *et al.* (2010) observaram que a localização regional do potencial eólico, concentrado principalmente no Nordeste, é bastante complementar à localização das outras fontes renováveis de energia disponíveis no país, já que a maior parte do potencial hidrelétrico ainda disponível está concentrada na região Norte, enquanto a Biomassa (cogeração a partir do bagaço de cana de açúcar) tem seu maior potencial nas regiões Sudeste e Centro-oeste.

A Figura 4 apresenta o potencial eólico brasileiro por regiões e o total, destaque para a região Nordeste que apresenta um potencial de 75 GW, e que por meio da análise do Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará, criado pela Secretaria de Infraestrutura do Ceará – SEINFRA/CE, publicado em 2001, percebe-se um potencial energético viável de mais de 25 GW, em seu litoral, com a perspectiva do aproveitamento energético utilizando uma plataforma continental offshore estimada em mais de 10,5 GW. Desta forma, a região Nordeste desponta como um dos maiores potenciais para geração de eletricidade através da energia eólica.

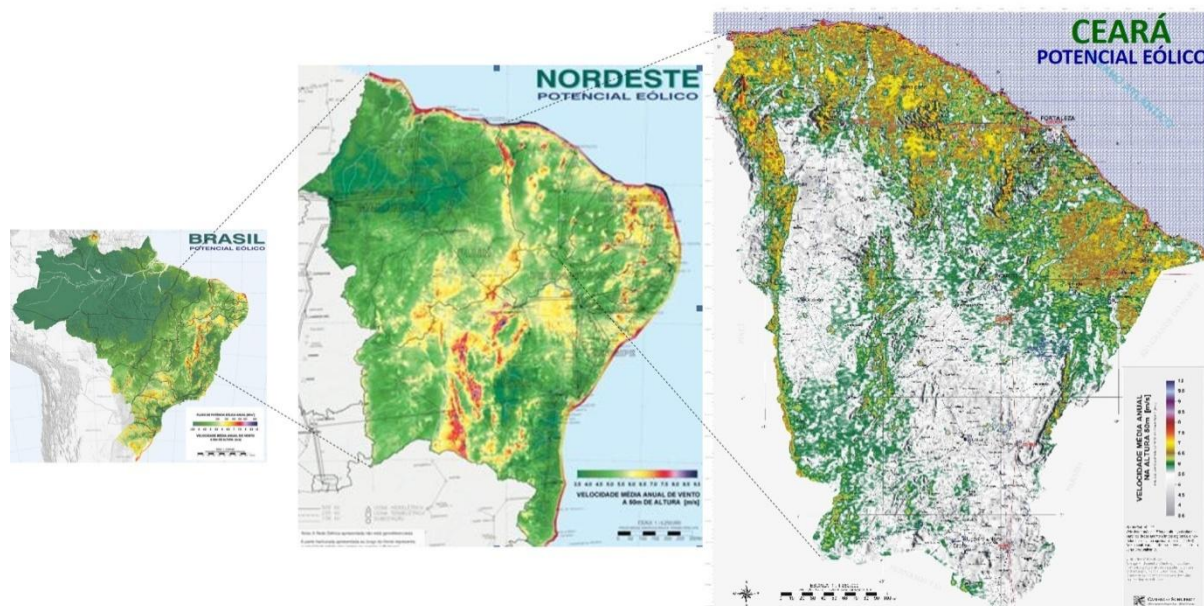
Figura 4 - Potencial eólico Brasileiro por regiões e o total



Fonte: CEPEL (2001).

Na Figura 5 é apresentado o esquema de uma escala de ampliação do mapa do potencial eólico de uma forma geral para o específico, bem como Brasil, Nordeste, e Ceará respectivamente, onde pode-se observar que o Nordeste é uma região bastante favorável à geração de energia elétrica através da fonte eólica, e no Ceará também verifica-se um bom potencial para este tipo de energia.

Figura 5 - Potencial eólico do Brasil, Nordeste, e Ceará



Fonte: SEINFRA (2001).

O Ceará possui 17 usinas eólicas em operação, onde as mesmas estão localizadas em Acaraú, Amontada, Aquiraz, Aracati, Beberibe, Camocim, Fortaleza, Paracuru e São Gonçalo do Amarante. Todas as usinas, somadas, têm uma capacidade instalada de 493,9 MW, sendo que seria suficiente para uma demanda equivalente a 744 mil famílias, aproximadamente (BELARMINO, 2013).

O potencial real de geração eólica no Ceará é de 13,5 GW de potencial médio para instalação de novos parques eólicos no litoral onshore, com mais 9,2 GW offshore e 3,5 GW nas áreas do interior do Estado, totalizando 26,2 GW. Muitas áreas do litoral não estão disponibilizadas para instalação de parques eólicos, sejam por serem áreas de proteção ambiental – APA's, ou por possuírem características físicas de declive inviável para instalação de usinas e por serem áreas de mangues e áreas juridicamente “indisponíveis”. Diante disso, conta-se com 40% da faixa litorânea que, se utilizar aerogeradores de 2,1 MW, poderá produzir 13,5 GW de potência nominal instalada, com velocidade média de vento de 8 m s^{-1} e fator real de capacidade 35% (Serviços de Manutenção Industrial e de Equipamentos de Extração de Petróleo - ENGEMEP, 2010).

No que se refere às plataformas offshore, o Ceará tem uma das maiores vantagens competitivas de todos os Estados brasileiros, senão do mundo, pois possui uma plataforma continental rasa com média de 8 m de profundidade em aproximadamente 35% de sua faixa litorânea. Essas características reduzem custos na instalação de uma usina, facilitam sua

manutenção e, conseqüentemente sua durabilidade, e nas regiões do interior do Estado possui áreas em três altiplanos principais na Serra da Ibiapaba, Chapada do Araripe e vale do Jaguaribe para a geração eólica (ENGEMEP, 2010).

Lage (2001), em análise do programa eólico do Ceará, concluiu pela sustentabilidade nas dimensões ecológica, econômica, social, espacial e cultural, destacando que a conversão da energia eólica não degrada o ambiente. Também não há quaisquer resíduos resultantes do processo de geração eólica, devido as suas próprias particularidades, e o custo da geração eólica no Brasil pode ser considerado como sendo de 40 US\$/MWh, sendo este custo decrescente, o que a curto prazo pode chegar a 35 US\$/MWh, e até mesmo a 30 US\$/MWh a médio prazo.

4.3 Importância da energia eólica para o desenvolvimento sustentável

A importância da energia eólica para o país torna-se inquestionável do ponto de vista do aproveitamento dessa energia para a promoção do desenvolvimento sustentável voltado ao atendimento da necessidade energética e para a sustentabilidade do crescimento econômico e social aliado à manutenção dos sistemas naturais (SOBRAL, 2009)

Nesse sentido, vale salientar a importância da energia dos ventos, como uma fonte alternativa para criar um clima favorável para a elaboração de novos cenários energéticos e ecologicamente melhores. Além disso, contribui para reduzir a dependência de combustíveis fósseis (petróleo, carvão, gás natural) e melhorar a economia local e a oferta de empregos (FREITAS, 2010).

A expansão territorial brasileira e seu sistema interligado, predominantemente baseado em hidrelétricas, conferem ao Brasil uma característica de maior sustentabilidade ambiental à energia eólica. Devido ao seu caráter intermitente, essa tecnologia deve ser compensada com usinas elétricas flexíveis, geralmente termelétricas, reduzindo o potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa dessa fonte (CARVALHO, 2012).

Já Porto *et al.* (2002), visando à implementação de uma política estável, eficaz e sustentável que possibilite uma maior participação de fontes alternativas e renováveis no setor elétrico brasileiro deve-se considerar que há uma racionalização energética pelo lado da oferta por meio da identificada complementaridade sazonal entre os regimes eólico e hidrológico, especialmente no Nordeste, traduzido pela seguinte produtibilidade na cascata do São

Francisco onde cada 100 MW médios produzidos de fonte eólica proporcionaria uma economia de água da ordem de $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

O aproveitamento da energia eólica é de vital importância, 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 (FERREIRA, 2006).

Burgueño e Silva (2003) afirmam que outro fator limitante do desenvolvimento de pequenas propriedades rurais é a disponibilidade de energia e que o aporte energético dessas áreas deve ser considerado como prioritário, possibilitando a melhoria das condições de vida, aumentando a produtividade do trabalho e, conseqüentemente, fixando significativas parcelas da população em seus locais de origem. E acrescenta que o aproveitamento da energia contida no vento pode auxiliar estas comunidades no processo de emancipação e auto-sustentabilidade. Isto representa um desafio, não apenas do ponto de vista institucional de descentralizar e ampliar a matriz energética nacional, mas também do ponto de vista técnico, por projetar e desenvolver equipamentos de geração de energia para baixas velocidades de vento.

Os aerogeradores são atualmente um dos melhores métodos de geração de energia elétrica em relação ao custo-benefício, apesar do custo relativamente baixo dos combustíveis fósseis. A tecnologia evolui continuamente, tornando-se mais confiável e mais barata e pode-se esperar que a energia eólica torne-se cada vez mais competitiva (BOYLE, 2004).

4.4 Aerogeradores de pequeno porte

No início do século, tem-se notícia de alguns dos primeiros aerogeradores desenvolvidos nessa área creditados aos dinamarqueses para a geração de energia elétrica. Também nos Estados Unidos, a partir da década de 1930, iniciou-se uma ampla utilização de pequenos aerogeradores para carregamento de baterias, o que favoreceu o acesso à energia elétrica aos habitantes do meio rural (AMARANTE *et al.*, 2001).

Conforme norma internacional para geradores de pequeno porte, a IEC-NORM 61400-2:2006 – Design Requirements for Small Wind Turbines, geradores de pequeno porte

são definidos como os que têm rotores com até 200 m². Considerando uma média de 350 W m⁻², isto significa uma potência máxima de 70 kW. Nesse caso, a torre não pode ser mais alta que 20 m. A maioria dos aerogeradores no mercado atualmente tem potências entre 5 e 10 kW. (IEC-NORM 61400-2: 2006; POLLICINO, 2009; SUN; WIND ENERGY 2010 *apud* VOGT, 2010).

O aerogerador algumas vezes é denominado de turbina eólica, no entanto, a turbina é o elemento do sistema eólico responsável pelo aproveitamento da energia cinética dos ventos, o que gera a transformação da energia do vento em energia mecânica de rotação para depois, por meio do gerador elétrico, convertê-la em energia elétrica necessária à alimentação de diversas cargas. No entanto, é preferível usar o termo aerogerador, pois a turbina eólica é somente uma das partes da máquina completa. Para operar satisfatoriamente, o aerogerador é constituído por diversos componentes e subsistemas, com características particulares a depender da sua finalidade (PINHO *et al.*, 2008).

Estas máquinas são utilizadas para a geração de energia elétrica por meio de acoplamento com geradores, mas também podem ser utilizadas em sistemas de bombeamento por meio de sistemas mecânicos (WENZEL, 2007). São diversas as aplicações, a depender das necessidades, principalmente em áreas remotas, onde são utilizados para geração doméstica de energia elétrica e para bombear água. Também são empregados em sítios turísticos ou naqueles longe das redes elétricas, para a geração de energia elétrica para operar todos os equipamentos de apoio e máquinas de processamento (VOGT, 2010).

O avanço tecnológico dos aerogeradores com o passar do tempo fez com que os moinhos de vento, pioneiros na área de usar a energia eólica para realizar trabalho, fossem substituídos, já que as perspectivas de uso da energia eólica para diversos fins aumentaram, e com isso, novos projetos de aproveitamento de energia eólica foram postos em prática, com a introdução de modernos aerogeradores, cujo desempenho é muito superior aos dos modelos antigos (NASCIMENTO, 2012).

Os aerogeradores modernos podem produzir energia em corrente alternada ou contínua que pode alimentar diretamente um motor CA ou CC, respectivamente, para bombeamento de água, sendo as bombas centrífugas as mais utilizadas para esse fim. Um inversor de frequência pode ser adicionado, para fazer a conversão de corrente na entrada da motobomba, tornando o processo de bombeamento mais eficiente (NASCIMENTO, 2012).

Os aerogeradores de pequeno porte são utilizados para provimento de energia em escalas variadas, para atendimento desde uma comunidade isolada, até pequenos arranjos para

gerar eletricidade em parques eólicos compostos por pequenos aerogeradores. Nestas escalas, os aerogeradores de pequeno porte são usados para suprimento de água, dessedentação de animais, irrigação e drenagem de várzeas, podendo ou não estar associados a outros dispositivos de geração e armazenamento de energia em sistemas híbridos, ou seja, sistemas com mais de uma fonte de energia (NASCIMENTO, 2012).

Segundo a CBEE, citado por Burgueño e Silva, (2003) formas de produção local, a exemplo, pequenos aerogeradores, poderiam vir a representar uma solução definitiva para suas necessidades de energia elétrica ou ainda a utilização de cataventos no bombeamento de água do subsolo para o uso agrícola e doméstico. Isto sugere a necessidade de um novo modelo energético que, por considerar as diversas fontes energéticas alternativas, devem ser tomadas como prioritárias no estabelecimento do desenvolvimento rural sustentável, ao equacionar os objetivos ambientais com os de aumento da produtividade, mantendo certa eficiência social, a fim de evitar maior exclusão dos pequenos produtores rurais.

4.4.1 Aerogerador de eixo horizontal

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns, e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização, em que são movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação e forças de arrasto. Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento (CRESESB, 2008).

Os aerogeradores de eixo horizontal, principalmente os de três pás (Figura 6), são atualmente muito mais utilizados para geração de energia elétrica, pois possuem rendimento maior do que os de eixo vertical. Entretanto, os de eixo vertical têm a vantagem de possuir o gerador instalado na base, ao nível do solo, e a possibilidade de captar energia dos ventos sem a necessidade de um mecanismo de orientação (NASCIMENTO, 2012).

Figura 6 - Aerogerador de eixo horizontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O modelo de aerogerador a ser utilizado na presente pesquisa é uma turbina de eixo horizontal, possui a tecnologia de geradores supercríticos SCF, leves em peso e tamanho. A energia cinética proveniente do vento coletado pela turbina é transformada em energia mecânica na forma de torque girante, a qual é aplicada ao gerador que a converte em energia elétrica por meio da conversão eletromagnética. A tecnologia de gerador supercrítico tira vantagens da estrutura e materiais especiais para fazer o gerador operar em estado crítico, melhorando a sua eficiência de conversão em grande medida (HUMMER, 2013).

Segundo a fabricante Hummer, os geradores com a tecnologia SCF diferem dos tradicionais pelo tamanho menor e mais leve em peso de 1/3 a 1/5 do tradicional, maior eficiência de geração de 10% a 30% do que os tradicionais, estrutura diferenciada do gerador SCF sendo localizado no cone do nariz, onde é fácil irradiar calor e reduz a resistência do vento, também adequado para operar em todas as condições meteorológicas, além da facilidade na montagem podendo ser montado manualmente, salvando assim custos de instalação e montagem, e por último menor ruído, 10% abaixo dos tradicionais.

4.4.2 Aerogerador de eixo vertical

Os rotores de eixo vertical (Figura 7) têm 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 e por forças de arrasto. Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus, Savonius e turbinas com torre de vórtices. Os rotores do tipo Darrieus são movidos por forças de sustentação e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao eixo vertical (CRESESB, 2008)

Figura 7 - Aerogerador de eixo vertical



Fonte: Cruz (2009).

Esse tipo de aerogerador aproveita o vento de todas as direções, sendo mais indicados para moagem de grãos, recargas de baterias, irrigação, e desses o Savonius e o Darrieus são os mais usados (CBTTE, 2001).

4.5 Distribuição e frequência probabilística do vento

A distribuição de velocidade típica de um local pode ser determinada de duas maneiras. A primeira é a partir da série temporal de medidas locais, e a segunda é a representação compacta de uma série de medidas locais, utilizando uma distribuição probabilística. Pesquisas apontam que o comportamento observado do vento ao longo de vários anos se dá de tal forma, que uma representação do seu comportamento médio pode ser satisfatoriamente realizada a partir de uma distribuição probabilística adequada (SILVA, 2003).

Existem várias distribuições probabilísticas que podem ser utilizadas para representar o comportamento do vento, a exemplo à densidade de probabilidade de Weibull, Rayleigh, Exponencial, e cada uma delas representa um determinado padrão eólico, ou seja, o comportamento do vento de um determinado local pode ser mais bem representado por uma determinada distribuição probabilística (SILVA, 2003).

A melhor distribuição estatística aplicada às ocorrências do vento na região Nordeste tem sido apontada como a função de densidade de probabilidade de Weibull, (RODRIGUES, 2003), em que estudos constatarem que a distribuição de Weibull conseguia retratar bem melhor um grande número de padrões de comportamento de vento. Isto se dá principalmente porque a distribuição de Weibull incorpora tanto a distribuição exponencial ($k=1$), quanto à distribuição de Rayleigh ($k=2$), além de fornecer uma boa aproximação da distribuição normal (quando o valor de k é próximo a 3,5). Outra grande utilidade da função de Weibull é retratar o comportamento de ventos extremos (SILVA, 2003).

Segundo Silveira (2011) para a obtenção da distribuição de Weibull específica para um determinado local faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros de forma (k) e de escala (c) da distribuição. O fator de escala está relacionado com a velocidade média do vento no local e o fator de forma é inversamente proporcional à variabilidade da velocidade do vento em torno da média. Quanto maior o fator de forma mais concentradas em torno da média estão às velocidades de ocorrência do vento no local.

Marinho, Cerqueira e Martinez (2006), e Marinho e Aquino (2009) comprovaram com estudos hipotéticos utilizando a distribuição de Weibull, que o Nordeste pode receber grandes quantidades de energia elétrica produzida pela fonte eólica, evitando que se tenha que utilizar a água do rio, inclusive no segundo semestre do ano, em que ocorrem as menores

vazões afluentes e onde ocorre o maior potencial de energia por grande influência dos ventos alísios.

Já Araújo (1998) fez um estudo para modelar os dados de velocidade de vento da região do rio São Francisco. Nesse estudo, concluiu-se que a distribuição que melhor se adaptou aos dados reais de velocidade de vento foi à distribuição de Weibull quando comparada com a distribuição de Rayleigh, em que os parâmetros de distribuição de Weibull foram calculados utilizando o Método da Velocidade Média e Desvio Padrão.

4.6 Energia eólica e irrigação

A energia eólica tem sido usada para bombeamento d'água desde o século XIII, na Holanda. Bombas eólicas de madeira de pequeno porte também foram utilizadas na França, Portugal e Espanha, bombeando água do mar para produção de sal a partir do século XV, e mais tarde, no século XIX, o bombeamento eólico também foi introduzido na América (VAN MEEL; SMULDERS, 1989).

A água é a principal fonte de vida para a humanidade e uma das mais básicas necessidades de desenvolvimento rural. A demanda rural de água para irrigação e abastecimento doméstico vem aumentando, porém precipitações estão diminuindo em muitos países áridos e com isso a água da superfície está se tornando escassa. Com essa tendência, o mecanismo de bombeamento de água passará a ser a única alternativa viável para extração de água subterrânea, que pode ser alimentada por fontes de energia renováveis (eólica), as quais são especialmente úteis em localidades remotas ou não, onde o fornecimento de combustível é escasso (ARGAW, 2003).

A irrigação tem importante papel, seja em função da necessidade de produzir alimentos, ou para a preservação do solo e recursos hídricos, bem como tem influenciado no uso da mão-de-obra, estimulando a substituição do trabalho temporário pelo permanente (PINO, 2003).

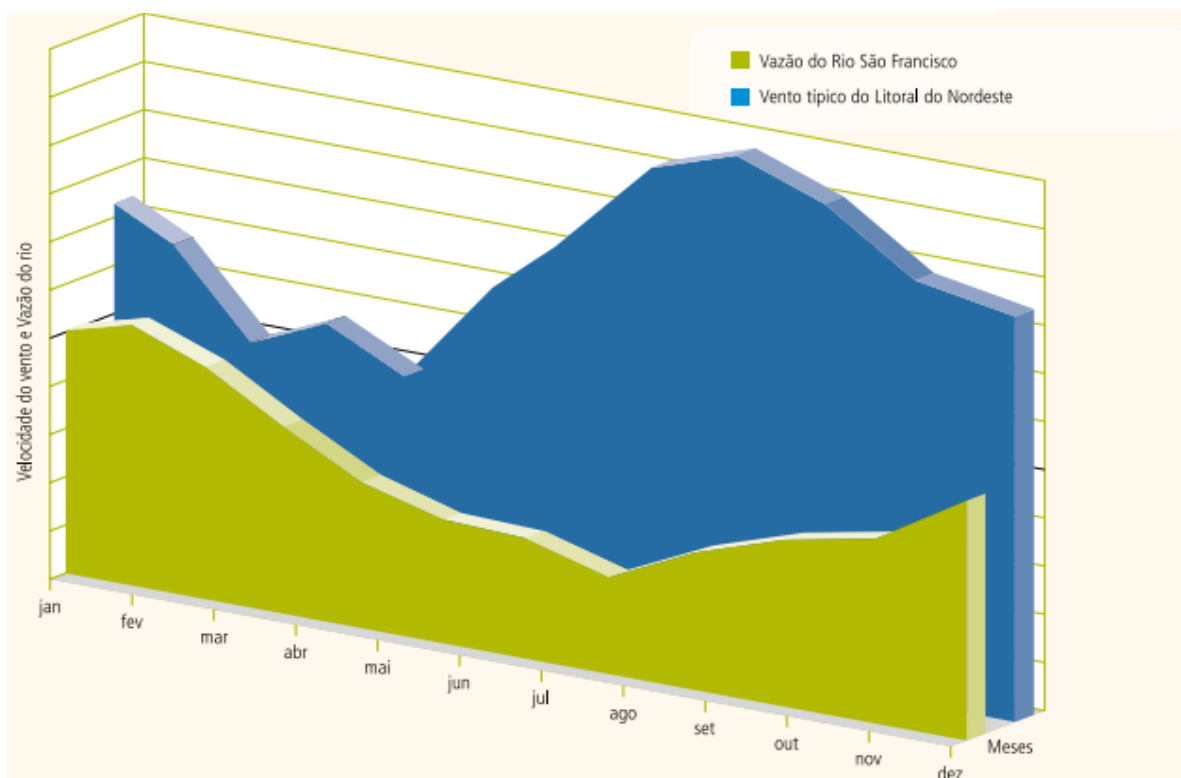
Uma das técnicas para o desenvolvimento da agricultura familiar é o sistema de irrigação por gravidade, proposto por (GILEAD, 1996) e (POLAK, 1997). Desenvolvidos como alternativas de baixo custo possuem um bom potencial para a redução de custo de implantação do sistema de irrigação por gotejamento, utilizando sistema de distribuição de água por gravidade, economizam mão-de-obra, permitindo utilizar pequenos mananciais de água, e sendo um sistema de fácil operação para o agricultor.

Segundo Ribeiro *et al.* (2005) o uso da irrigação localizada vem crescendo cada vez mais devido ao avanço tecnológico na agricultura irrigada que procura, sempre, métodos de irrigação que apresentem grande eficiência aliada à redução nos custos de produção, consumo de energia e economia de água.

Na ótica da agricultura sustentável, a irrigação localizada atualmente é o método de maior eficiência no uso da água, o que tem atraído a atenção dos produtores. A água é aplicada por gotejadores ou microaspersores de forma pontual, somente a região da raiz é molhada. Desse modo, as perdas de água por evaporação ou deriva são minimizadas, não ocorre o molhamento tanto das partes do solo onde não há cultura instalada, quanto da parte aérea das plantas, que podem provocar doenças fúngicas, como é o caso da irrigação por aspersão. Por isso, o volume de água para irrigação localizada é menor quando comparado aos demais métodos, sendo uma vantagem para locais onde os recursos hídricos são escassos ou que enfrentam conflitos pelo uso da água (GRAH *et al.*, 2012).

A energia eólica pode contribuir para resolver o dilema do uso das águas do rio São Francisco no Nordeste Brasileiro (irrigação ou geração de eletricidade). É notória a intensificação cada vez maior do uso da água para irrigação em grandes projetos agrônômicos às margens do rio que estão em fase de implementação, inclusive a transposição das águas para outras regiões. Percebe-se que as maiores velocidades de vento no Nordeste do Brasil ocorrem justamente quando o fluxo de água do Rio São Francisco é mínimo. Logo, as centrais eólicas instaladas podem gerar energia elétrica reduzindo o volume de água do rio São Francisco para este fim (CBEE, 2013). A Figura 8 apresenta a comparação do comportamento do fluxo de água no Rio São Francisco e o regime de ventos no decorrer de um ano para o Nordeste do Brasil.

Figura 8 - Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica



Fonte: CBEE (2013).

No Brasil, há a possibilidade de combinação das usinas hídricas e eólicas, criando um sistema com maior confiabilidade, uma vez que a energia eólica gerada poderá ser estocada nos reservatórios hidrelétricos, aumentando assim o fator de capacidade das usinas hidrelétricas e dispensando a ativação das termelétricas. Esse fato é ainda mais relevante, sendo a geração eólica no Brasil maior no período de menor volume dos reservatórios. No Brasil, um sistema hidroeólico seria capaz de suprir toda a demanda de energia elétrica futura da população brasileira (CARVALHO, 2012). Quando bem planejada, a inserção de grandes volumes de energia eólica em sistemas predominantemente hidrelétricos pode resultar no acúmulo de energia nos reservatórios, otimizando o uso desses e aumentando a segurança no fornecimento de energia, ao atenuar os impactos de períodos de seca (DENAULT *et al.*, 2009).

Para Andrade (1990) o incremento da agricultura irrigada necessita do incremento de sistemas de irrigação simples, de baixo custo de aquisição e de baixo ou nenhum uso de energia convencional e que possam ser individualmente comercializados. E Santos *et al.* (1996) acrescentam que o funcionamento de sistemas de irrigação localizada de baixa pressão

de serviço permite a utilização de fontes energéticas alternativas que pela utilização de estruturas como aerogeradores, tanques para armazenamento da água com pressão suficiente para acionamento dos emissores.

De maneira geral, o manejo racional da irrigação tem importância fundamental em regiões como o Nordeste do Brasil onde os recursos hídricos e energéticos são limitados. Uma das alternativas do setor, mais dependente de energia é o bombeamento da água, no qual podem ser empregados sistemas alternativos de energia (KOLLIG *et al.*, 2001). A utilização de qualquer forma de energia no meio rural, possibilita ao produtor obter, de forma decisiva, benefícios sociais e econômicos dificilmente conseguidos por quaisquer outras formas de investimentos de infraestrutura.

4.7 Agricultura familiar e irrigação

Segundo Wanderley (1996), a agricultura familiar é definida como aquela em que a família, ao mesmo tempo em que é proprietária dos meios de produção, assume o trabalho no estabelecimento produtivo. Já para Delgado e Cardoso Júnior (2001), a agricultura familiar, dentro da estrutura agrária brasileira, tem laços históricos no processo de formação econômica do país, que tem tradição de grandes propriedades e sobreviveu ao processo de modernização da agricultura. Esse setor foi responsável pelo fornecimento de mão-de-obra para atividades urbanas por muito tempo e chegou aos anos de 1990 com aproximadamente metade dos postos de trabalho do setor rural.

Essa população rural, que sobrevive ao progresso tecnológico e ao processo de modernização da agricultura, é constituída, em grande parte, por agricultores familiares. Segundo o Censo Agropecuário de 2006, há aproximadamente 4.367.902 estabelecimentos familiares no Brasil nesse segmento, que ocupam uma área de cerca de 80 milhões de hectares, ou seja, 84,4% dos estabelecimentos rurais, o que representa 38% do valor bruto total da produção agropecuária e 74,4% da mão-de-obra rural. Esses estabelecimentos, também são responsáveis por grande parte da produção nacional de alimentos (mandioca, feijão, leite, milho, suínos, aves e ovos) para o consumo interno (IBGE, 2009).

Os pequenos produtores rurais praticam uma agricultura de base familiar, com padrões tecnológicos de exploração e cultivo distintos e através de relações de produção diferenciadas. Os problemas básicos que afetam esse conjunto de produtores são a dificuldade de acesso a terra, água e energia levando a uma baixa sustentabilidade econômica e ambiental

dos sistemas de produção. Os estabelecimentos de até 100 ha empregam quase 85% do pessoal ocupado na agricultura (enquanto os de mais de 1000 ha geram apenas 2,5% das ocupações), neles se produzem 81% do feijão, 82,5% do arroz, 80% do milho e 90% da mandioca (IBGE, 2009)

A irrigação tem sido importante estratégia para otimização da produção mundial de alimentos, proporcionando desenvolvimento sustentável no campo, com geração de empregos e renda de forma estável. Atualmente, mais da metade da população mundial depende de alimentos produzidos em áreas irrigadas (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2007). Os mesmos autores afirmam ainda que a irrigação não deve ser considerada isoladamente, mas sim como parte de um conjunto de técnicas utilizadas para garantir a produção econômica de determinada cultura com adequados manejos dos recursos naturais.

O método de irrigação classificado como localizado em sistema gravitacional com reservatório elevado, consiste na aplicação da água numa área restrita ao sistema radicular da planta, igualmente ao sistema de irrigação localizado convencional, porém com economia de energia, já que o sistema distribuirá a água na área por gravidade, o que significa um sistema otimizado energeticamente.

Lacerda e Oliveira (2007) enfatizam que a irrigação só é rentável e sustentável, se realizada de forma adequada, por meio de técnicas que maximizem a eficiência do uso do solo e da água, promovendo assim, a redução de custos operacionais e impactos ambientais. Já Pinheiro, Amaral e Carvalho (2010) acrescentam que a agricultura irrigada é uma atividade importante porque pode gerar efeitos socioeconômicos substanciais, desde que esteja em harmonia com o meio ambiente.

Na agricultura irrigada a obtenção de altas produtividades envolve várias técnicas de condução da cultura, durante todo processo produtivo. Estas técnicas requerem investimentos na aquisição de equipamentos que possam garantir produtividades economicamente satisfatórias, além da constante busca por maior produção. Procura-se também reduzir o custo operacional do empreendimento agrícola, em que o manejo eficiente da irrigação, associado à tecnologia levem ao bom desenvolvimento da cultura, torna-se possível, ao mesmo tempo, uma agricultura autosustentável e lucrativa (PINHEIRO, 2008)

A diversificação da produção é um dos principais fundamentos da gestão técnica da agricultura familiar a favor da sustentabilidade, pois além de satisfazer diferentes necessidades econômicas (entre elas a de autossuficiência da família), a diversidade da

produção favorece a otimização do emprego da mão-de-obra da família, do espaço e dos recursos naturais e econômicos disponíveis, garantindo também uma maior flexibilidade na gestão do sistema, tanto para resistir às circunstâncias adversas como para potencializar as condições favoráveis (PETERSEN, 2003).

Existem limitações ambientais para o uso de técnicas convencionais de irrigação no semiárido, sendo um dos mais sérios a salinização, que vem ocorrendo em perímetros irrigados da região, devido a projetos cujas bases técnicas foram mal definidas. Por outro lado, existe viabilidade técnica e econômica da irrigação localizada de base familiar, principalmente em áreas sedimentares (COSTA, 2006).

Segundo Fronza e Schons (2008), o uso da irrigação em Figueira Roxo-de-Valinhos, obteve aumento de 11 t de figos maduros quando se utilizou a irrigação. A produtividade passou de 21 t ha⁻¹ para 32 t ha⁻¹, ou seja, houve um acréscimo de R\$ 22.000,00 por ha (sendo preço ao produtor de R\$ 2,00 por kg).

Fronza e Schons (2008) estudando a viabilidade do uso da irrigação na goiabeira Paluma encontraram aumento de produtividade de 28 t ha⁻¹, passando de 35 t ha⁻¹ para 63 t ha⁻¹, comparando ensaios sem irrigação e irrigados, respectivamente. Os autores citam ainda a importância do desenvolvimento de novas formas de bombeamento d'água para áreas rurais onde a disponibilidade da rede elétrica é menor e/ou distante, muitas vezes inviabilizando o uso da irrigação.

Ao apoiar a irrigação de base familiar com tecnologias apropriadas deve-se associar os instrumentos de reforma agrária aos instrumentos de financiamento à pesquisa, a assistência técnica e capacitação, ao financiamento de obras de captação e distribuição de água e de fornecimento de energia elétrica, e ao financiamento para implantação de culturas irrigadas, além do incentivo ao associativismo e cooperativismo entre os irrigantes e apoio à comercialização, devem ser parte integrante de um processo de irrigação voltado à agricultura familiar (COSTA, 2006).

4.8 Análise dimensional

A análise dimensional é uma ferramenta útil para o conhecimento de determinado fenômeno, em que reduz consideravelmente a complexidade das variáveis envolvidas no problema, seja ela física ou numérica, e por último para apresentação de resultados experimentais, por meio da redução matemática dos dados obtidos.

Taylor (1974) afirma que a análise dimensional é usada inconscientemente por todo engenheiro e cientista que pensa em problemas físicos, pois trata das relações entre as diversas variáveis que entram no problema que se baseiam em quantidades físicas, dimensões e quantidades adimensionais.

Segundo Roberson e Crowe, (1993) a análise dimensional é muito empregada em várias áreas da engenharia e muito adequada para a sistematização de dados. Dentre outros produtos que essa ferramenta pode propiciar, se destaca a obtenção de fórmulas envolvendo diversos parâmetros, sejam físicos, químicos e biológicos, relacionados com o problema em consideração. Já Guimarães (2001) menciona que análise dimensional pode ser entendida como uma técnica que tenta depreender alguma regularidade inerente ao fenômeno em estudo. Muitas vezes, a interdependência entre as grandezas físicas é muito complexa, porém mesmo os fenômenos caóticos ou os fractais apresentam certo grau de regularidade, e que a análise dimensional permite também que as grandezas físicas sejam combinadas de maneira a evidenciar aspectos em comum entre os fenômenos físicos.

Na análise dimensional as dimensões precisam ser estabelecidas como fundamentais, com todas as outras dimensões sendo expressas em termos desta. As dimensões fundamentais são o comprimento (L), o tempo (T), a massa (M) e a temperatura (θ). O comprimento, simbolizado por (L) tem-se as dimensões da área e do volume que são expressas como L^2 e L^3 , respectivamente. O tempo, simbolizado por (T), incluído na velocidade e aceleração que são expressas como $L T^{-1}$ e $L T^{-2}$, respectivamente (BRAGA FILHO, 1998).

Bargues *et al.* (2005) afirmam que a partir da análise dimensional e do teorema de BUCKINGHAM é possível reduzir os parâmetros considerados pouco relevantes a adimensionais mais expressivos, facilitando os cálculos das funções.

Rodriguez *et al.* (2004) afirmam que o método de análise dimensional é aplicado em estudos em que a complexidade evita ou dificulta a elaboração de uma teoria analítica em expressões físicas, sendo que a análise dimensional permite um apropriado entendimento dos processos através de quantidade físicas simples.

4.9 Viabilidade econômica

Custodio (2009) afirma que para dar suporte à decisão de investimento, é importante realizar uma análise de viabilidade econômica. Para tal, devem-se utilizar métodos

e critérios específicos de análise de projetos de investimentos, utilizados na área de engenharia econômica, os quais demonstram com clareza os retornos sobre os investimentos, possibilitando a escolha da melhor alternativa, com a consequente otimização dos recursos.

A taxa interna de retorno (TIR) é um número intrínseco ao projeto e não depende de nenhum parâmetro que não os fluxos de caixa esperados deste projeto. Sua importância é crucial para a avaliação de sistema econômico porque discrimina em que percentual ocorre a remuneração do capital. Portanto em todos os projetos de investimento que visam à viabilidade econômica a TIR é indispensável como índice de decisão, principalmente porque relativiza numa taxa os ganhos ou perdas do empreendedor (PENA *et al.*, 2011).

Com relação ao tempo de retorno (*Payback*) conforme Pena *et al.* (2011) a importância deste índice reside no fato de que, atualmente, os empreendimentos estão priorizando aplicações em negócios que sejam pagáveis em menor período, possibilitando, por exemplo, novas negociações para novos investimentos com outras taxas e prazos que visem expandir o negócio. O ganho do empreendimento associado a um rápido retorno ou pagamento do investimento inicial pode representar mais competitividade ao sistema e, de fato, tem contribuído para o sucesso de muitos projetos.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização da área do experimento

A instalação do experimento no que se refere o sistema de geração de energia (aerogerador), o sistema de bombeamento de água, e os aparelhos para coleta de dados, todos foram instalados nas dependências do Centro de Ciências Agrárias da UFC, especificamente no contraforte do açude Santo Anastácio, Figura 9, situada na Universidade Federal do Ceará em Fortaleza-CE, Brasil. O mesmo localiza-se a jusante do Açude e geograficamente a $3^{\circ}44'$ de latitude Sul e $38^{\circ}34'$ de longitude Oeste, e 11 m de altitude.

Figura 9 - Local de instalação do experimento no Campus do Pici - UFC



Fonte: Google Earth (2013).

5.2 Descrição do sistema

O referido sistema faz parte do Laboratório de Energias Renováveis para a Agricultura do Semiárido (LERAS) da Universidade Federal do Ceará (UFC). A turbina eólica é pertencente ao Laboratório de Energias Alternativas (LEA) do Departamento de Energia Elétrica (DEE)-UFC e foi cedida para a realização deste trabalho. Utilizou-se um aerogerador de 1 kW, uma bomba centrífuga com motor de 0,5 cv, um reservatório elevado, um banco de baterias, um inversor de frequência que tem a função de gerenciar o

acoplamento do aerogerador ao conjunto motobomba, um anemômetro de conchas para verificação da velocidade do vento, e para registrar grandezas como corrente e voltagem geradas a partir da turbina eólica foi utilizado um alicate amperímetro digital.

5.2.1 Aerogerador

O aerogerador utilizado no experimento para gerar energia elétrica para acionamento do conjunto motobomba possui a tecnologia de geradores supercríticos (SCF), com ímã permanente. As especificações técnicas do aerogerador com as características mecânicas e elétricas são apresentadas na Tabela 1, que constituirá o sistema de geração de energia elétrica para acionamento do sistema de bombeamento de água.

Tabela 1 - Especificações técnicas do aerogerador da HUMMER H3.1-1KW

Características mecânicas da turbina	
Diâmetro da lâmina	3.1 m
Quantidade de lâminas	3
Material da lâmina	GRP
Velocidade do vento de partida	3.0 m s^{-1}
Velocidade nominal do vento	9.0 m s^{-1}
Velocidade funcional do vento	$3 - 25 \text{ m s}^{-1}$
Taxa de rotação nominal	500 rpm
Coeficiente de potência máximo (C_p)	0.45
Altura da torre	8 m
Características eletromagnéticas do gerador	
Potência nominal	1000 W
Potência máxima	2000 W
Tipo de gerador	Alternador magnético permanente
Eficiência do gerador	>0.8
Peso do gerador	15 kg
Tensão de saída do sistema	220 V corrente alternada
Tensão do banco da bateria	60 V corrente continua
Frequência de saída do sistema	0 – 400 Hz
Amperagem nominal	15 A
Amperagem máxima	30 A
Método de regulagem da velocidade	Guinada + frenagem por eletromagnetismo
Método de desligamento	Manual

Fonte: HUMMER (2013).

5.2.2 Conjunto motobomba

Para realização do bombeamento d'água foi usado um conjunto motobomba do tipo centrífuga modelo QB60 de 0,5 cv de potência com motor de indução de 2 pólos e 3450 rpm a 60 Hz da marca INAPI, mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Conjunto motobomba utilizado no experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O conjunto motobomba por sua vez trabalhou afogado, ou seja, realizou a sucção d'água do reservatório de modo que ficou a um nível abaixo da fonte de água, e conduziu a mesma por meio de tubulações até o reservatório elevado. A tubulação foi composta por tubos de sucção para o processo de captação de água, e recalque para a condução dessa água até o reservatório, e sistemas de válvula e registro para o controle de vazão e pressão.

A Tabela 2 apresenta os valores de vazão em função da altura manométrica para o conjunto motobomba usado no sistema eólico de bombeamento.

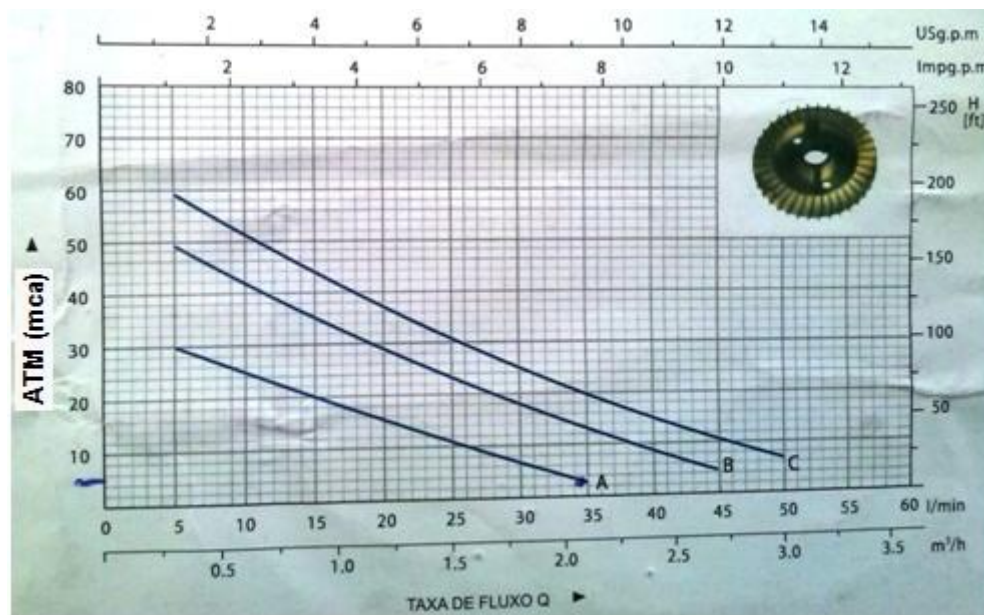
Tabela 2 - Dados do conjunto motobomba utilizado

Tabela 2 – Dados de conjuntos motor-elétrica utilizados															
NÚMERO	TIPO	POTÊNCIA		Q(m³ h ⁻¹)	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3
		kW	HP		Q(l min ⁻¹)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
A	QB60	0,37	0,5	H	35	30	25	20	15	10,5	6,5	3	-	-	-
B	QB70	0,55	0,75		55	49	43	37	30	23	17	12	8	5	-
C	QB80	0,75	1		65	59	52	45	38	31	25	19	14	10	7

Fonte: INAPI (2014).

A curva de desempenho mostra o rendimento hidráulico nas condições de operação e a potência requerida para cada valor de vazão em função da altura manométrica dos três modelos (Figura 11). Nesta, a curva do modelo da bomba utilizada corresponde a curva A com uma altura manométrica total (ATM) de 5 mca, obtendo uma taxa de fluxo de $2,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Figura 11 - Gráfico do desempenho da bomba utilizada no experimento



Fonte: INAPI (2014).

5.2.3 Reservatório elevado

No armazenamento do volume de água bombeado utilizou-se uma caixa d'água da marca FORTLEV com capacidade de 500 L (Figura 12), onde a mesma ficou instalada sobre uma laje montada acima de um cubículo com altura de 4,5 m. Junto ao reservatório estão interligados tubos de entrada e saída de água respectivamente sucção e recalque.

Figura 12 - Estrutura com o reservatório elevado

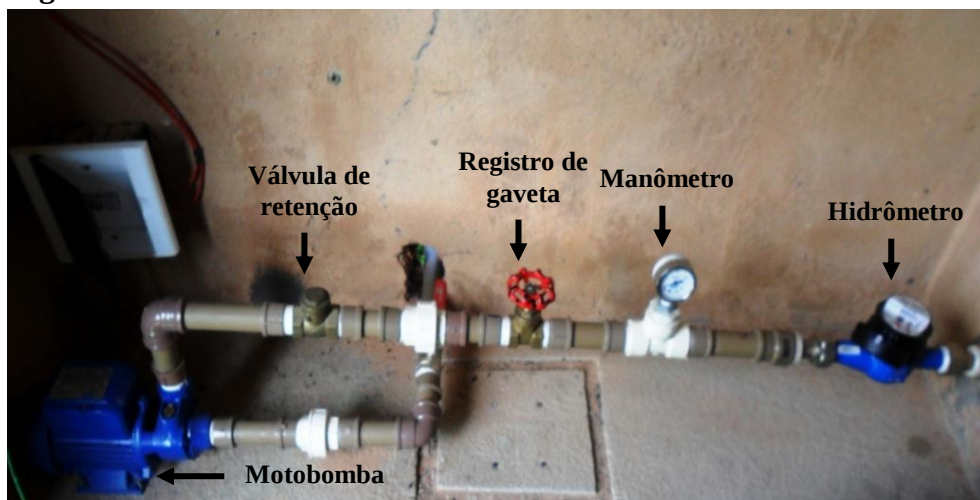


Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O sistema funcionou em um circuito fechado com a finalidade de conhecer o volume de água bombeado pelo sistema que poderá ser aproveitado para a irrigação. No entanto, a energia elétrica gerada pelo sistema eólico era armazenada no reservatório elevado na forma de energia hidráulica potencial que poderá ser utilizada em um sistema de irrigação por gotejamento gravitacional, que se caracteriza como um sistema de irrigação de baixo custo de modo que diminuiu o tempo de funcionamento do conjunto motobomba, reduzindo significativamente o consumo de energia elétrica na irrigação.

Na Figura 13 são apresentados os outros componentes que compõem o sistema hidráulico, como as tubulações para o processo (sucção e recalque) com diâmetros de 1", um hidrômetro para medir a vazão de recalque da marca FAE Tecnologia, modelo A13F261178 com capacidade de vazão nominal de $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, um manômetro para realizar a medição da pressão do sistema, da marca INAPI, capacidade de medição máxima de 40 mca, e uma válvula de retenção para a proteção do conjunto motobomba.

Figura 13 - Sistema hidráulico da unidade de bombeamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.2.4 Banco de baterias

Utilizou - se um banco de baterias composto por 5 baterias de 12V e 150Ah, Figura 14, por recomendação do fabricante do aerogerador, uma vez que o inversor que compõe o sistema elétrico realiza o acoplamento ao motor elétrico mediante o uso de baterias para ter uma maior estabilidade do processo, sendo que essas baterias armazenam energia para acionamento do conjunto motobomba.

Figura 14 - Banco de baterias do sistema eólico-elétrico



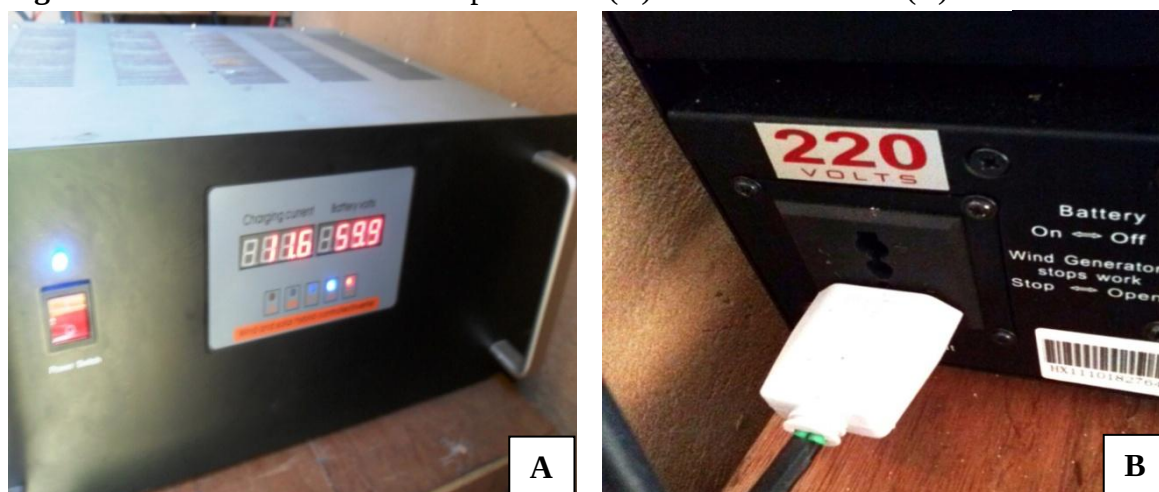
Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

As cinco baterias utilizadas neste sistema possuem tensão nominal de 12 V DC cada uma, e são ligadas em série entre elas e em paralelo com o inversor para que a tensão de saída destas seja compatível com a tensão nominal de acionamento do motor elétrico 60 V DC, em que era convertida pelo inversor para 220 V em AC. Estas baterias foram utilizadas com a finalidade de armazenar energia suficiente para o acionamento do motor elétrico, por intermédio do inversor de frequência, e também, para entregar ao motor elétrico uma energia com tensão constante dentro de sua faixa operacional e servir como um sistema de estabilização das variações ocorridas durante o processo de geração.

5.2.5 Inversor de frequência

O inversor utilizado foi o modelo HX1110182764 da marca Hummer com capacidade nominal de 1000 W, o mesmo executa a retificação de corrente alternada (AC) para corrente contínua (DC), quando está carregando a bateria, porém quando está alimentando a carga converte de DC para AC. Este inversor é ligado na saída do aerogerador recebendo a alimentação em corrente alternada, em que a converte para corrente contínua para carregamento do banco de baterias. Quando o mesmo já estava completamente carregado o inversor retificava do banco de baterias em corrente contínua e convertia para corrente alternada disponibilizando 220 V em sua saída para a alimentação do motor elétrico. As Figuras 15A e 15B mostram o inversor de frequência utilizado e a tensão de saída.

Figura 15 - Inversor utilizado no experimento (A) e a tensão de saída (B)



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O inversor foi conectado em paralelo com o banco de baterias e tem por finalidade direcionar a energia gerada pelo aerogerador para a carga em frequências compatíveis com o sistema a ser alimentado. Quando a tensão nas baterias estava a um nível abaixo de 60 V, o inversor interrompia o fornecimento de energia para o motor direcionando a mesma para as baterias visando o seu carregamento, iniciando novamente a ligação quando as baterias tinham sido carregadas a um nível em que possibilitasse o acionamento do sistema (situação essa em que as baterias estivessem com 60 V).

Outra característica importante do inversor de frequência é a indicação luminosa. Esta indicação é feita através de dispositivos localizados na sua parte superior, bem como luzes de desvio que indicavam que o banco de baterias já estava completamente carregado e que o excesso de potência está sendo dissipado sob a forma de calor através de vinte lâmpadas denominadas de luzes de desvios com potência e tensão nominais de 100 W e 120 V cada. A Figura 16 mostra o inversor em operação e as luzes de desvios dissipando energia e indicando que as baterias já estão carregadas.

Figura 16 - Inversor de frequência indicando baterias carregadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

No entanto, essa dissipação de energia na forma de calor, pode ser armazenada em outro banco de baterias ou utilizar uma eletrônica de potência que realize o acoplamento do aerogerador a carga de forma direta, com a finalidade de otimizar a utilização do sistema.

5.2.6 Anemômetro de conchas

O anemômetro tem por finalidade realizar a medição da velocidade do vento. No experimento foi utilizado um anemômetro de conchas por ser um sistema de medição de menor custo de aquisição, uma vez que o estudo propõe-se à agricultura familiar. O modelo utilizado foi o NRG #40C da marca NRG system formado por três copos que giram em um eixo vertical. Tendo em vista que a rotação dos copos é proporcional à velocidade do vento, em que a leitura dos dados é dada por uma onda AC de baixo nível e a frequência desse sinal AC é proporcional à velocidade do vento, o mesmo realizava leituras a cada um segundo e registrava a média a cada 10 minutos totalizando 144 registros por dia.

Na Figura 17 apresenta-se o anemômetro de conchas utilizado no presente trabalho, o qual estava instalado em uma torre treliçada a 8 m de altura numa haste fixada na extremidade superior da torre, encontrando-se afastado da torre do aerogerador a uma distância de 75 m.

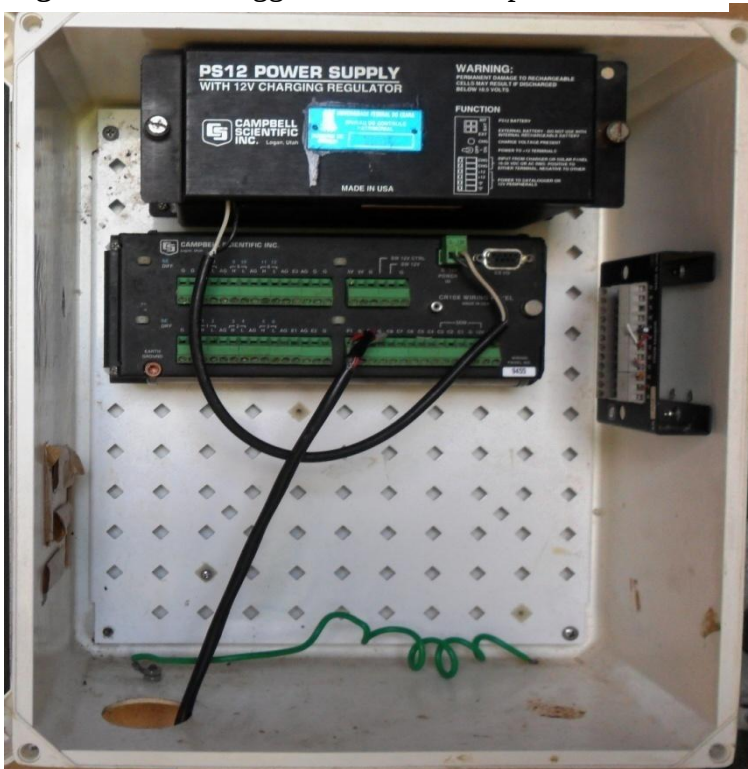
Figura 17 - Anemômetro de conchas utilizado no experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Com relação ao sistema de armazenamento dos dados de vento foi utilizado um *datalogger* modelo CR10X do fabricante CAMPBELL, que tem a função de armazenar as grandezas físicas de natureza não elétrica, onde foi conectado o anemômetro de conchas usado para medição da velocidade do vento, Figura 18.

Figura 18 - Datalogger utilizado no experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Nesse modelo, CR10X, apresentado na Figura 18, tem-se um painel com conectores que estabelecem a interligação entre ele e os outros componentes de medição, um conector do tipo DB 9 é usado pela porta Serial RS 232 I/O (Entrada / Saída) empregada na comunicação entre o *datalogger* e computador, em que essa porta é usada tanto para carregar o programa no *datalogger*, quanto para coletar os dados, bem como descarregar (download) do mesmo. O sistema de alimentação do *datalogger* pode ser realizado através de uma bateria de 12 V conectada diretamente nos terminais G e 12 V do *datalogger*.

5.2.7 Alicate amperímetro digital

Para medição da corrente e da voltagem do aerogerador foi usado um alicate amperímetro multifuncional da marca Minipa modelo ET – 3III com resolução de 0,01 A, e corrente máxima de 1000 A em corrente alternada (Figura 19). Era realizada a medição a cada 10 minutos de forma manual, em que na verificação da corrente colocava o alicate em um dos fios de transmissão do aerogerador, e o valor era mostrado no visor do amperímetro. No entanto para medição da voltagem era realizado através dos cabos de prova do alicate, onde colocava os mesmos no ponto de interligação dos dois fios do aerogerador com o inversor.

Figura 19 - Alicates amperímetro digital



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.3 Metodologias de avaliação de turbinas eólicas

A medição da velocidade do vento é considerada, de fato, o ponto crítico para avaliação do potencial de geração de energia elétrica pelo sistema eólico. A precisão nessa medição determina o desempenho e a predição da energia anual gerada pelo sistema para atender uma determinada demanda de energia específica no sistema de produção.

5.3.1 Medições da velocidade do vento

Segundo Jain (2011), existem duas formas de medição do vento, a medição *In Situ* que é feita através de uma torre meteorológica ou um instrumento de medição local, e a medição por sensoriamento remoto, que pode ser feita através do modelo SODAR (Sonic Detection and Ranging), que é baseado em ondas sonoras, ou LIDAR (Light Detection and Ranging), que é baseado em ondas luminosas.

Na medição *In Situ*, a torre capta a velocidade e direção do vento, pressão e temperatura. As torres meteorológicas são classificadas como temporárias ou permanentes, considera-se temporária quando a torre é instalada de 1 a 3 anos para medição e, considera-se permanente quando são instaladas para a medição em torno de 20 anos.

Os modelos de torres encontradas são na faixa de 30 a 100 metros, todavia, as mais comuns são as torres com 60 m de altura. Vale salientar que podem ser instalados os

equipamentos de medição na altura de funcionamento do aerogerador. No caso do presente estudo foram realizadas leituras com um anemômetro de conchas instalado em uma torre a 8 m de altura, próximo ao local onde está instalada a turbina eólica para ter mais confiabilidade e precisão nas medições.

5.3.2 Metodologias estatísticas da função de distribuição

Com relação à curva de frequência da velocidade do vento existem várias funções para descrever a probabilidade de ocorrência de uma determinada velocidade do vento, em que foi usada a densidade de probabilidade de Weibull, por ser mais utilizada em estudos de ventos, e adequada aos regimes de ventos do Nordeste Brasileiro, o mesmo não ocorrendo com a distribuição de Rayleigh. As mesmas possuem, respectivamente, dois e um parâmetros, sendo o fator de forma (k) e o fator escala (c). A função densidade de probabilidade de Weibull é dada na equação 1, em que v é a velocidade do vento, k é o parâmetro de forma e c é o parâmetro de escala.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Vários métodos são utilizados para calcular os parâmetros de forma e escala. O mais comum é utilizado quando são conhecidas a velocidade média e a variância do vento no local. A partir do conhecimento da velocidade e variância é possível calcular os parâmetros k e c a partir das equações 2 e 3 encontradas em vários autores inclusive em Custódio, 2007.

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1,086} \quad (2)$$

Onde:

σ : desvio padrão da velocidade do vento ($m s^{-1}$);

v : velocidade média do vento ($m s^{-1}$).

$$c = \frac{v}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

O fator de forma, $k = 1$ a distribuição de Weibull torna-se uma distribuição exponencial, para $k = 2$ a distribuição de Weibull torna-se uma distribuição de Rayleigh e quando $k > 3$ se aproxima de uma distribuição de Gauss. Outro detalhe importante do parâmetro de forma k é que no momento em que a velocidade do vento for constante a turbulência será pequena, resultando assim, em um grande valor do parâmetro k , porém quando o comportamento da velocidade do vento for variável, resulta em um valor pequeno do parâmetro k e consequentemente em alta turbulência.

Vale salientar que para os ventos registrados no Nordeste brasileiro a distribuição de Weibull se ajusta muito bem, o mesmo não ocorrendo com a distribuição de Rayleigh. Portanto no presente estudo foi usada a densidade de probabilidade de Weibull para se conhecer a frequência de distribuição da velocidade do vento do local de instalação da turbina eólica.

5.3.3 Potência extraída do vento

O cálculo da quantidade de energia a ser transferida ao rotor do aerogerador é dado em função da densidade do ar, área de varredura das pás e da velocidade do vento. Dessa forma pode-se calcular essa potência pela equação 4.

$$P_w = \left(\frac{1}{2}\right) \rho * A * v^3 \quad (4)$$

Onde:

P_w = potência do vento (Watts);

ρ = massa específica do ar (kg m^{-3});

v = velocidade do vento (m s^{-1});

A = área da seção transversal (m^2).

A equação 4 apresentada permite afirmar que a potência do vento e consequentemente, a potência de saída da turbina variam de forma direta e proporcional ao cubo da velocidade do vento. Dessa forma a variação de uma unidade a mais na velocidade do vento implica em aumento ao cubo na potência disponível. Essa constatação explica a importância do conhecimento e da confiabilidade na avaliação da velocidade do vento no local de instalação do aerogerador.

A conversão da energia cinética disponível em energia gerada é alcançada pela redução na velocidade do vento. No entanto, o rotor do aerogerador não pode converter totalmente essa energia em energia mecânica (CUSTODIO, 2002). Sendo que Betz, apud Ackermann e Soder (2002), em 1926 apresentou pela primeira vez sua formulação, determinando que a máxima potência que pode ser extraída do vento é dada pela equação 5.

$$P_{\max} = \left(\frac{1}{2}\right) * \rho * A * v^3 * C_{p\text{Betz}} \quad (5)$$

Onde:

$C_{p\text{Betz}}$ = Coeficiente de Betz = 0,59.

Dessa forma, foram realizados os cálculos com relação à potência gerada pela turbina eólica. Vale ressaltar que qualquer tipo de perda durante a conversão da energia cinética em energia mecânica já estão contabilizadas no C_p da máquina, sendo que somente será possível a conversão de 59% de toda a energia cinética disponível no vento teoricamente.

5.4 Planejamento estatístico

No que se refere ao planejamento estatístico, inicialmente foi realizada a definição das variáveis avaliadas no experimento para a partir de então definir qual o planejamento estatístico adotado. Primeiramente determinaram-se as seguintes variáveis: velocidades do vento, corrente e voltagem do aerogerador, vazão e pressão do sistema hidráulico para posteriormente se estimar a quantidade de amostras que seriam necessárias para que possivelmente houvesse normalidade nos dados avaliados. A metodologia estatística adotada nos permite verificar o número de amostras necessárias para que haja normalidade dos dados por meio do erro médio padrão.

Foi aplicada a equação sugerida por Montgomery (2004) para que fosse encontrado o erro médio padrão como mencionado anteriormente. Na equação 6 foi inserido os dados da média e do desvio padrão de trabalhos já realizados em campo por outros pesquisadores como Acunha Junior (2006), e Lopes (2011), pois por meio dos dados que os mesmos obtiveram foi possível calcular o erro médio padrão para posteriormente determinação do número de amostras necessárias para a obtenção de normalidade nos dados estudados.

$$d = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (6)$$

Onde:

d = erro médio padrão;

μ_1 = velocidade média do vento (m s^{-1});

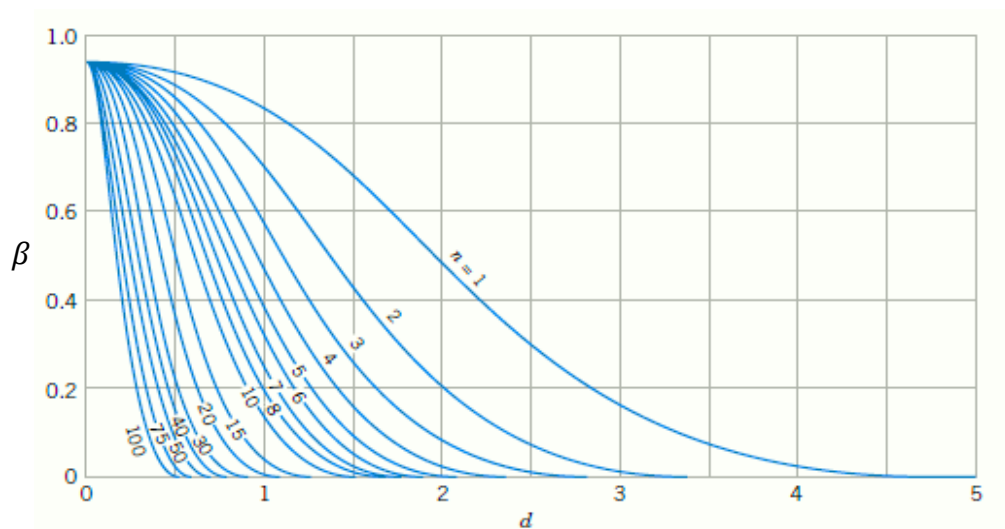
μ_2 = velocidade média do vento (m s^{-1});

σ_1 = desvio padrão (m s^{-1});

σ_2 = desvio padrão (m s^{-1}).

Com o erro médio padrão calculado e considerando o erro β de 10%, no gráfico de curvas características de operação Figura 20, foi encontrado o número mínimo de amostras. Pode-se observar no eixo y a representação do erro β de 10%, e no eixo x o erro médio padrão e as linhas do gráfico representam o número de amostras que são necessárias para que possivelmente obtivesse normalidade nos dados avaliados no experimento.

Figura 20 - Curvas características de operação para diferentes valores de n para o teste em frente e verso normal para um nível de significância $\alpha = 0,05$



Fonte: Montgomery (2004).

O número de amostras obtido forneceu uma estimativa do número de valores que seriam necessários para que possivelmente ocorresse normalidade nos dados observados no experimento em campo. Isso justifica o uso de um planejamento, pois há uma maior

probabilidade de que os dados avaliados possuam uma distribuição normal. Em seguida, depois de determinar o número de amostras que seriam necessários para o experimento, foram iniciadas as primeiras coletas de dados.

5.5 Análise dimensional

A análise dimensional foi realizada mediante a necessidade de determinar a interação entre a turbina eólica e a bombeamento d'água com a finalidade de conhecer o comportamento dos mesmos no que se refere ao acionamento do conjunto motobomba por meio do aerogerador para determinação do ponto ótimo de operação dos dois sistemas.

Considerando o que se propõe o experimento referente ao recalque de água para um reservatório elevado, o que possibilita o uso da irrigação por gotejamento gravitacional na agricultura familiar acionado através de uma turbina eólica, tem-se as seguintes variáveis que foram avaliadas:

Altura manométrica (Hm) obtida pelo manômetro por meio da relação da equação 7. Sabendo-se que a medida obtida no experimento é pressão (Pr), a análise dimensional foi baseada na pressão do manômetro que estava instalado logo após o conjunto motobomba para medir a pressão do sistema hidráulico, medido em mca e transformado para Pascal (Pa).

$$Hm = \frac{Pr}{\rho * g} \quad (7)$$

A densidade do ar (ρ) foi obtida em função da temperatura do ar no momento da obtenção da medição, e a unidade de medida (kg m^{-3}).

A vazão da bomba (Q) foi medida utilizando-se um hidrômetro instalado na tubulação de recalque em que o mesmo registrava o volume de água que atravessava em (L s^{-1}) e depois foi realizada a transformação para ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

A potência elétrica (Pot) foi determinada por meio da multiplicação da corrente (A) e da voltagem do aerogerador (Volts), ambos coletados através de um alicate amperímetro multifuncional em intervalos de 10 minutos, em que a unidade foi (Watts).

Já a velocidade do vento (V) foi obtida através de um anemômetro de conchas que realizava a medição a cada um segundo e registrava a média a cada 10 minutos, e a unidade adotada foi (m s^{-1}).

Em seguida foi definida a matriz dimensional do experimento, através de suas unidades dimensionais apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz dimensional do experimento

Símbolo genérico	Símbolo	M	L	T
K ₁	Pr	1	-1	-2
K ₂	ρ	1	-3	0
K ₃	Q	0	3	-1
K ₄	Pot	1	2	-3
K ₅	V	0	1	-1

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Após a definição da matriz dimensional do estudo foi definida a matriz característica do experimento também por meio de suas unidades dimensionais, tabela 4.

Tabela 4 - Matriz dimensional característica do experimento

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
M	1	1	0	1	0
L	-1	-3	3	2	1
T	-2	0	-1	-3	-1

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Feito isso foi escolhido o subespaço da matriz dimensional característica e calculado o determinante desse subespaço da matriz:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & -3 & 3 \\ -2 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Em que o determinante foi 6, entretanto, quando o determinante for diferente de zero significar que a matriz característica representa um espaço tridimensional, assim o número de PI-terms é o número de variáveis menos a dimensão do espaço linear $5-3=2$.

Em seguida foi resolvido o sistema de equações lineares homogêneas representadas nas equações 8, 9 e 10 respectivamente.

$$K_1 + K_2 + K_4 = 0 \quad (8)$$

$$-K_1 - 3K_2 + 3K_3 + 2K_4 + K_5 = 0 \quad (9)$$

$$-2K_1 - K_3 - 3K_4 - K_5 = 0 \quad (10)$$

As variáveis principais foram consideradas K_1 , K_2 e K_3 , portanto K_4 e K_5 são composições das mesmas e foram determinadas às seguintes equações 11, 12 e 13 respectivamente.

$$K_5 = 2 \times K_2 \quad (11)$$

$$K_4 = -K_1 - K_2 \quad (12)$$

$$K_3 = K_1 + K_2 \quad (13)$$

Realizado este procedimento por meio das equações chegou-se à definição da matriz solução, para posterior determinação dos PI-termos, apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Matriz solução dos PI-termos

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
PI_1	1	0	1	-1	0
PI_2	0	1	1	-1	2

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Na sequência foi determinada a forma genérica dos PI-termos descritas nas equações 14 e 15.

$$Pi_1 = (K_1 \times K_3) \div K_4 \quad (14)$$

$$Pi_2 = (K_2 \times (K_3) \times (K_5^2)) \div K_4 \quad (15)$$

E por fim foi definida a forma real dos PI-termos nas equações 16 e 17, para inserir os valores e posterior confecção do gráfico adimensional.

$$Pi_1 = (Pr \times Q) \div Pot \quad (16)$$

$$Pi_2 = (\rho \times (Q) \times (V^2)) \div Pot \quad (17)$$

Estes PI-termos perfazem um gráfico adimensional que possibilitará avaliar o ponto ótimo de operação do sistema e a característica intrínseca deste fenômeno (geração eólica e bombeamento de água).

5.6 Viabilidade econômica

Para a realização da análise da viabilidade econômica, foi utilizado o software RETScreen® Internacional. É uma poderosa ferramenta de análise financeira de projetos de geração renovável idealizada pelo centro Canadense Natural Resource Canada's (NRCan). O mesmo é totalmente livre de custos para estudantes, sendo disponibilizado pelo Governo do Canadá, e também um comprovado ativador de projetos de energia limpa em todo o mundo, apoiando a decisão de investimento em energias renováveis adotado mundialmente por peritos do governo, indústria e pela academia (RETScreen®, 2014).

Os indicadores de rentabilidade obtidos por meio do software foram o *Payback* (prazo de retorno do investimento) e TIR (taxa interna de retorno), em que o programa mostra através de um gráfico se o projeto é viável ou não.

O software RETScreen® trabalha com modelos de planilhas, o software pode ser usado para avaliar a produção e economia de energia, reduções de emissões, e análises financeiras, não apenas de energia renovável como também de eficiência energética. Alguns autores utilizaram o RETScreen® em seus trabalhos, como Altoé; Oliveira Filho (2010), Dutra; Tolmasquim (2002).

A ferramenta também inclui um amplo banco de dados de produtos, projetos, e condições climáticas. As informações sobre produtos presentes derivam de diversos fabricantes comerciais de equipamentos existentes. Enquanto dados meteorológicos históricos são extraídos pelo software por estações de medição terrestre e/ou pelos dados de satélite obtidos pela NASA.

5.7 Metodologia estatística

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com apenas um fatorial, o volume de água bombeado pelo sistema em função da velocidade do vento. De

acordo com esse esquema fatorial utilizado, a finalidade foi estudar os efeitos principais das variáveis que compõem o processo e os efeitos das interações entre as mesmas.

As variáveis medidas no experimento foram velocidade do vento, tensão e corrente do aerogerador, vazão e pressão do sistema hidráulico. Primeiramente foi realizada a análise descritiva para analisar os seguintes parâmetros estatísticos: média, desvio padrão, coeficiente de variância, simetria e curtose, sendo que através dos coeficientes de simetria e curtose foi determinada a normalidade dos dados e utilizou-se a análise de variância para as médias que apresentaram normalidade. Porém quando os dados não se apresentaram normais foi utilizado a média móvel ponderada (MMEP) para avaliar a variabilidade que ocorreu entre as médias encontradas.

As médias que apresentaram normalidade foram comparadas pelo teste da diferença mínima significativa (DMS) a 5 % de significância. Os dados foram analisados através do Software Minitab – Versão 16. Também foi utilizado o programa Excel para elaboração de gráficos e análise regressão das correlações da potência gerada pela turbina eólica.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Velocidade do vento

Os dados obtidos com relação à velocidade do vento estão apresentados por meio da análise descritiva na Tabela 6, em que a média encontrada foi de $5,14 \text{ m s}^{-1}$, considerando apenas os valores de velocidade que no momento da obtenção o sistema de bombeamento estava em operação apresentados na Figura 22. Pois, conhecendo a faixa de valores que geravam energia suficiente para funcionamento do conjunto motobomba, permite-nos determinar qual velocidade média do vento é necessária para acionamento do sistema hidráulico.

Tabela 6 - Estatística descritiva da velocidade do vento a partir os dados medidos

Velocidade do vento	
Número de Amostras	250
Média (m s^{-1})	5,14
Desvio Padrão (m s^{-1})	1,48
Variância	2,27
Coeficiente de Variação (%)	28,75
Máximo	8,76
Mínimo	1,88
Simetria	0,21
Curtose	-0,23

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Verifica-se ainda um desvio padrão de $1,48 \text{ m s}^{-1}$ e coeficiente de variação de 28,75 % que são parâmetros estatísticos importantes para análise da velocidade do vento, podendo caracterizar uma boa precisão dos dados obtidos no experimento. No que diz respeito à normalidade dos dados de acordo Oliveira (2010), se os coeficientes de simetria e curtose apresentarem valores dentro de um intervalo de -3 a 3, considera-se que ocorreu normalidade nos dados analisados.

Dessa forma pode-se afirmar que os dados avaliados com relação à velocidade média do vento obedeceram a uma distribuição normal, pois encontram-se dentro do intervalo mencionado pelo autor. Sendo assim a análise de variância pode ser considerada eficiente para analisar se há diferença significativa entre a velocidade e o período de coleta de dados.

Sobral (2009) em seu trabalho com relação à avaliação do potencial eólico para geração de energia na zona rural do estado de Sergipe, mais precisamente no município de Gararu, especificamente dados de vento no mês de maio, em que está correlacionado com o mês que foi realizado o presente trabalho, obteve valores muito semelhantes aos valores observados nesse estudo, uma velocidade média do vento de $4,96 \text{ m s}^{-1}$, com um desvio padrão de $1,42 \text{ m s}^{-1}$, e coeficiente de variação de 28,75 %.

No que diz respeito à análise de variância referente ao teste F para a avaliação da velocidade do vento apresentado na Tabela 7, pode-se observar que houve diferença significativa das médias da velocidade do vento com os dias de medição a nível de 5 % de significância.

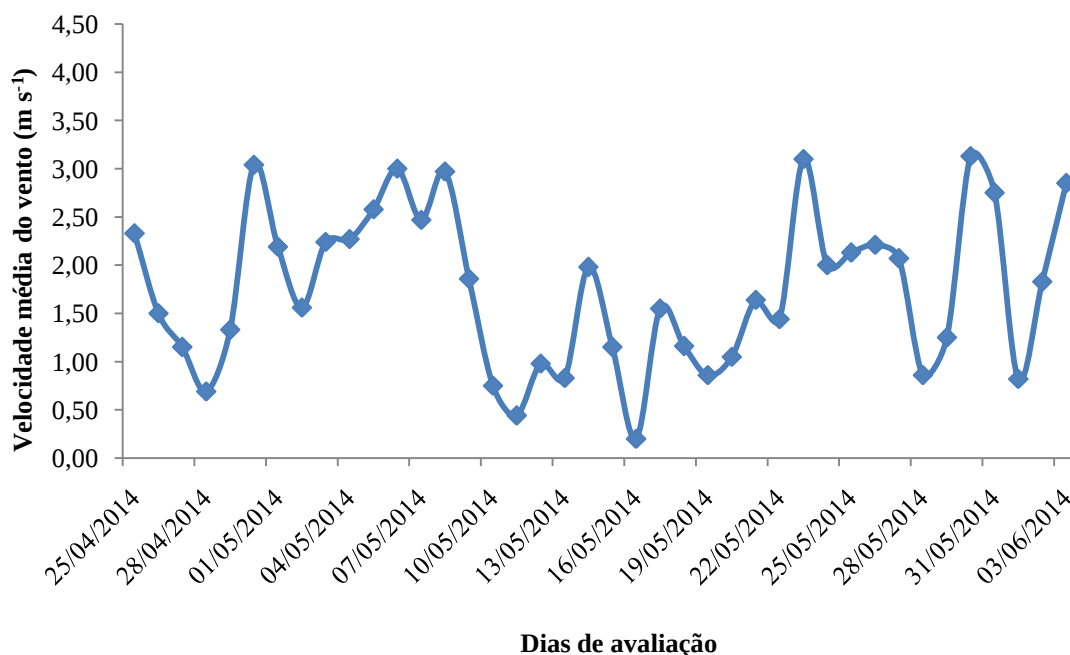
Tabela 7 - Análise de variância da velocidade do vento

FV	DF	SS	MS	F	P
Fator	4	38,83	9,71	2,28	0,002
Erro	245	555,47	2,27		
Total	249	594,30			

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Os dados médios do vento medidos, mostrados na Figura 21, foram obtidos por meio de um anemômetro instalado a 8 m de altura, o qual está localizado na mesma altura do rotor do aerogerador. Compreendendo o período entre 25 de abril de 2014 a 03 de junho de 2014, em que o sistema de medição e armazenamento de dados anemométricos efetuou medidas a cada 1 segundo, registrando a média dos dados a cada 10 minutos, totalizando 144 registros por dia. Na qual é apresentado o comportamento da velocidade média diária do vento durante todo o experimento, onde pode-se verificar que os valores médios mais altos foram de $3,10$ e $3,13 \text{ m s}^{-1}$ nos dias 23 e 30 de maio, respectivamente.

Figura 21 - Velocidade média diária do vento durante os dias de avaliação



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Vale ressaltar que esse período de avaliação compreendendo os meses de abril e maio, são os meses do ano de menor potencial eólico, uma vez que na quadra chuvosa verificam-se menores valores de velocidade do vento. Porém foi interessante a observação nesse período porque pode-se determinar o desempenho do sistema eólico em baixas condições de vento, pois é importante o conhecimento do funcionamento dos modelos de aerogeradores atuais do mercado em função da característica de baixo vento, visto que é necessário mais pesquisas no sentido de desenvolver novos perfis aerodinâmicos que apresentem melhor performance nessas condições.

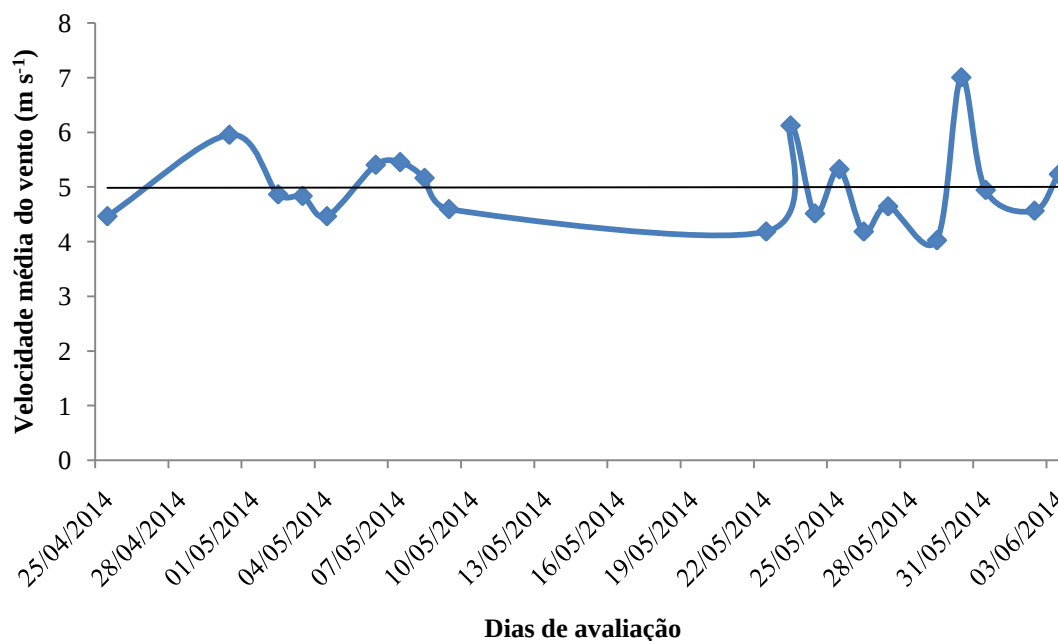
Conforme Manwell *et al.* (2002) o desempenho de um dado gerador de uma turbina eólica pode ser relacionado com três pontos chave na escala de velocidade. Primeiro a velocidade de entrada (Cut-in): velocidade mínima a partir da qual a turbina fornecerá potência útil (entre 2,5 a 3,5 m s⁻¹). Segundo a velocidade nominal do vento em que o aerogerador atinge a potência nominal (geralmente a máxima potência fornecida pelo gerador elétrico). E por último a velocidade de corte (Cut-out): Velocidade do vento a partir da qual a turbina é desligada para evitar problemas estruturais.

No entanto, pode-se verificar que essa velocidade média diária do vento observada, não representa a real condição de faixas de velocidades ideais para operação do sistema, pois não permite o funcionamento do sistema por muito tempo, mesmo funcionando de forma indireta, no qual o aerogerador gerava energia elétrica em AC, entregava ao inversor que convertia a mesma, para DC, alimentando assim o banco de baterias. Quando o banco de baterias estava carregado totalizando 60 V em DC, o inversor novamente convertia essa corrente para 220 V em CA, a uma frequência de 60 Hz, e por fim alimentava o motor elétrico, acionando assim o sistema de bombeamento.

Portanto, os resultados dos valores de velocidade do vento mostraram-se baixos. Porém dentro da faixa de intervalos que se encontra a média, existem valores altos de velocidade que apesar da curta duração são suficientes para produzir energia em quantidade satisfatória para acionar o motor.

Na Figura 22 observa-se a velocidade média do vento, no momento em que o sistema de bombeamento estava em operação. Então pode-se verificar que a faixa de operação é maior do que aquela registrada durante todos os dias relatados anteriormente, onde observa-se um intervalo de velocidade de 4 a 7 m s⁻¹.

Figura 22 - Velocidade média do vento de funcionamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

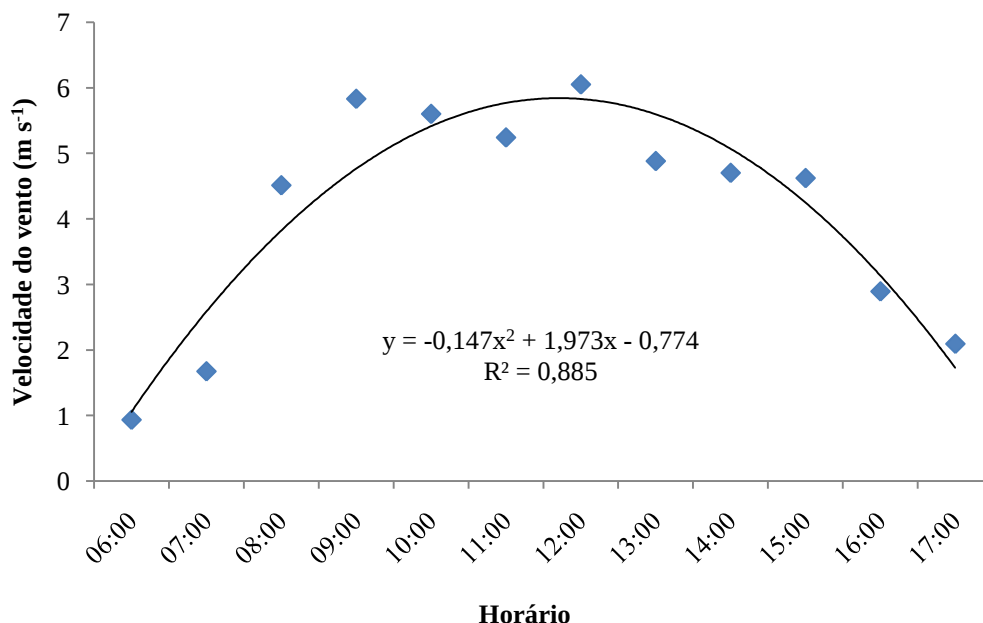
Com relação à configuração do sistema aerogerador e conjunto motobomba no modo de interligação indireta mencionado anteriormente, a mesma é efetuada através do inversor que estabelece as melhores condições de operação do sistema, no que se refere à estabilização da tensão de entrada no motor elétrico, visto que apresenta dependência direta com a rotação da turbina que por sua vez depende da velocidade do vento. Deste modo, o inversor estabelece uma faixa de frequências em que deve ocorrer o acoplamento entre gerador e motor elétrico.

Dessa forma, quando a tensão de carga elevava-se para a tensão de proteção 15 V por bateria, o inversor através de luzes de desvio, realizava a descarga dessa energia por meio da dissipação de calor, e quando ocorria à queda de tensão para 13,5 V por bateria, a turbina eólica iniciava o carregamento normal do banco de baterias. Porém quando a mesma chegava à tensão de proteção 10,5 V por bateria, o inversor interrompia o trabalho, consequentemente o sistema de bombeamento, e por fim, quando a tensão da bateria aumentava até a tensão de recuperação 11,5 V por bateria, o inversor retomava o trabalho depois de reiniciado.

Portanto é imprescindível a avaliação da velocidade que permite acionar o motor, e analisar a ocorrência dessas velocidades ao longo do dia, visto que o vento é uma variável que depende de muitos fatores como altitude, temperatura, rugosidade do terreno e vários outros, e que os mesmos influenciam a sua variação durante dia.

6.1.1 Distribuição da velocidade do vento

O comportamento diário do vento deve ser analisado de modo que se possa determinar com maior precisão os valores de velocidade do vento a cada hora, e os fatores que influenciam na sua variação. Sendo assim, foram realizadas medições da velocidade média do vento durante todo o dia. Porém apenas no período diurno especificamente das 06:00 h às 17:00 h, pois o sistema não tinha programação automática, então foi adotado apenas o período diurno, devido a dificuldade de manuseio do sistema no período noturno. A Figura 23 apresenta o comportamento diurno com relação à média horária do vento no local de instalação do aerogerador.

Figura 23 - Comportamento diurno da velocidade média do vento

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

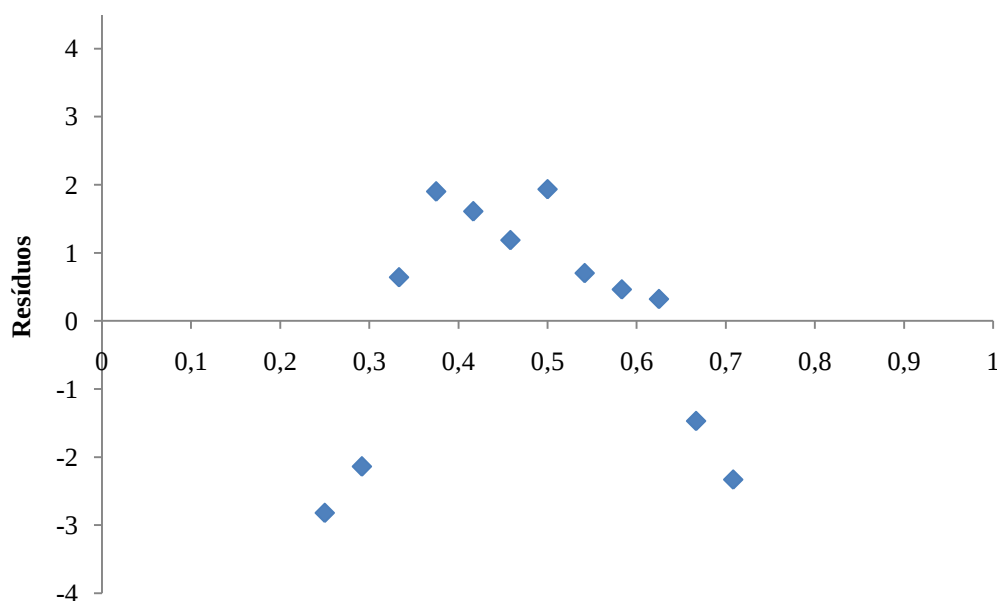
Pode-se observar que o regime de ventos mostra uma variação típica ao longo do dia, com valores de velocidade média baixos nas primeiras horas do dia, e permanecendo praticamente numa crescente até as horas mais quentes do dia, diminuindo seus valores a partir das 15:00 horas. Esta curva característica de um polinômio com uma crescente e posterior diminuição pode ser justificada pelo fator temperatura, uma vez que com o aumento da temperatura tem-se uma maior movimentação das massas de ar presentes na atmosfera e o seu aparecimento está diretamente relacionado às variações na pressão do ar.

Conforme Santana (2009), estas variações são originadas termicamente através da radiação solar e das fases de aquecimento das massas de ar, onde locais mais quentes, o ar dilata-se, ficando mais leve e rarefeito, e sobe resultando numa queda de pressão atmosférica no local. Já nos locais mais frios, o ar se condensa ficando mais pesado, com maior pressão, tendendo a escapar para as áreas mais vazias, como os locais mais quentes, dando origem aos deslocamentos na forma de ventos.

Lopes (2011) em um estudo no mesmo local em 2010, observou um comportamento semelhante, que entre 7 e 16 horas ocorreram as maiores velocidades de vento que foram de 3 m s⁻¹ e com maior concentração de velocidades médias em torno de 5 m s⁻¹ entre 8 e 13 horas, suficiente para a produção de energia elétrica, e entre as 13 e 18 horas, a velocidade média decresce até 3 m s⁻¹.

Na Figura 24 é apresentada a análise dos resíduos, em que dá indicação de que os resíduos aparecem distribuídos aleatoriamente próximos da reta x, com dispersão constante, indicando que a análise de regressão é válida para representar o modelo, uma vez que seguem uma distribuição normal, e os erros apresentam independência.

Figura 24 - Análise de resíduos da velocidade versus horário



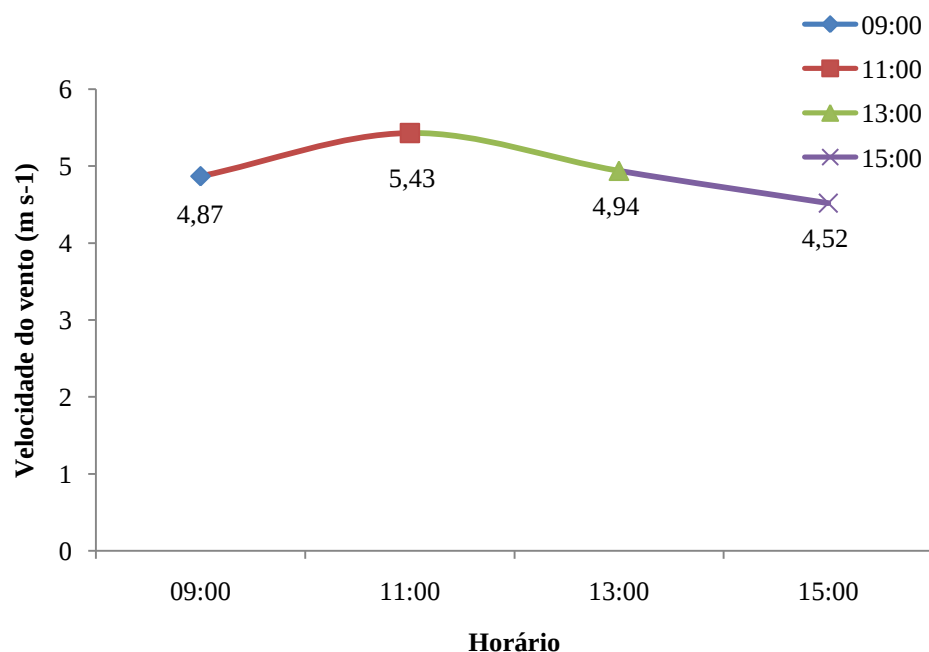
Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Portanto é fundamental realizar o balanço energético do sistema, com relação à demanda de energia, e o período de maior velocidade do vento com a finalidade de otimização do sistema com um todo, assim é possível bombear mais água tornando o processo mais flexível tanto para resistir às circunstâncias adversas como para potencializar as condições favoráveis.

Deste modo o estudo do comportamento dos ventos na determinação do potencial para geração de energia deve considerar os movimentos de larga escala, e também os fatores de pequena escala que podem interferir no movimento dessas massas de ar. O resultado disso é que pode-se determinar durante o dia as horas de maior potencial para gerar energia.

A Figura 25 apresenta as maiores velocidades registradas, e qual hora o sistema possivelmente era acionado por mais tempo, onde no período da tarde se registram as máximas velocidades de vento, enquanto que pela manhã as velocidades são menores.

Figura 25 - Velocidades médias de acionamento do sistema de bombeamento

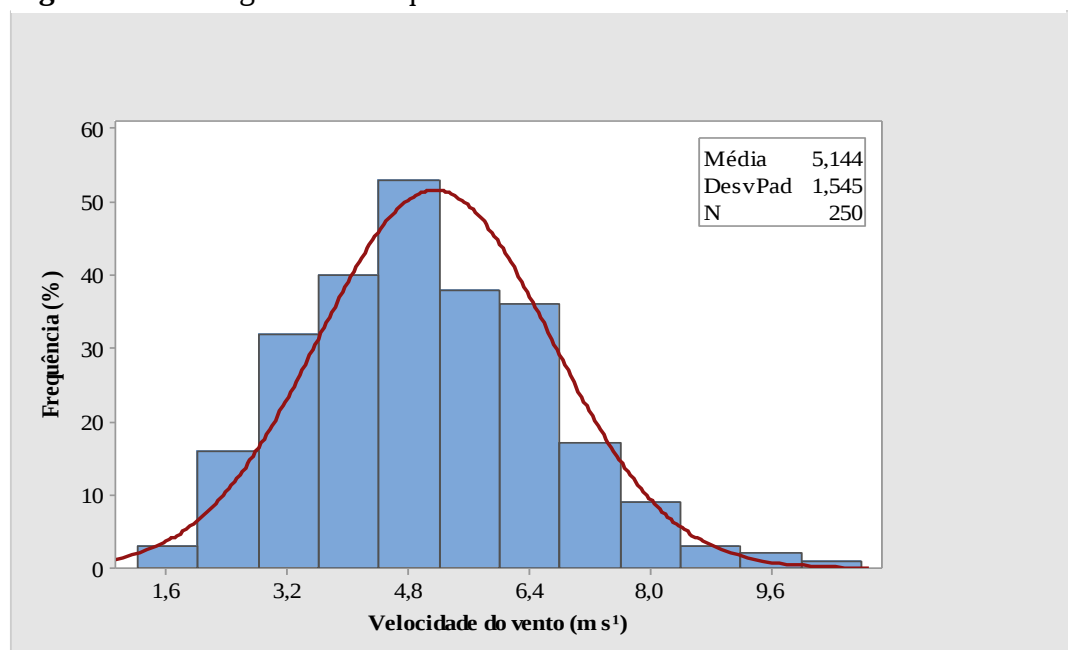


Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Conforme, Sobral (2009) avaliando o potencial eólico para geração de energia na zona rural do estado de Sergipe, especificamente no município de Umbaúba, mostra que está em conformidade com o caso geral para regiões equatoriais em que o período da tarde registra as maiores velocidades ao longo do dia, tendo registrado em seus dados maiores velocidades médias entre 12 e 15 horas.

Na Figura 26 têm-se o histograma de frequência relativa da velocidade do vento no momento em que o sistema de bombeamento estava em operação, com classes de $1,6 \text{ m s}^{-1}$, no decorrer do experimento, compreendendo o período entre 25 de abril de 2014 a 03 de junho de 2014. Também foi realizado o ajuste da curva usando a função densidade de probabilidade de Weibull, sendo caracterizada por dois parâmetros, o parâmetro de forma, k , e parâmetro de escala, c .

Figura 26 - Histograma de frequência relativa da velocidade do vento medida



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Pode-se verificar que a distribuição de frequência representa um percentual de tempo no qual um determinado valor de velocidade do vento ocorreu, onde observa-se uma predominância maior de ventos na faixa de operação do sistema de 4,4 a 5,2 m s⁻¹, apresentando uma percentagem de ocorrências de 53 %, correspondendo a velocidade média de 4,8 m s⁻¹, na qual pode ser utilizada para avaliar a potência possível de ser convertida para o sistema.

A distribuição de Weibull que melhor se ajustou a este histograma é caracterizada pelo fator de forma $k = 3,69$ e por um fator de escala de $c = 5,14 \text{ m s}^{-1}$. Esta apresenta uma boa aderência aos dados de vento representados no histograma de distribuição de frequência. Conforme Cunha (2008) o parâmetro de forma, k se relaciona de forma inversa com o desvio padrão da distribuição. Assim, grandes valores de k indicam baixa variabilidade do vento em relação à sua intensidade.

Segundo Rocha *et al.* (2012) em seu trabalho com relação a determinação dos parâmetros de Weibull comparando sete métodos numéricos mostrou que apenas o método gráfico apresentou um erro notável. Todos os demais, inclusive o método empírico utilizado no presente estudo mostraram boa precisão na determinação desses parâmetros para a geração de energia eólica na região Nordeste do Brasil.

Vários outros autores tais como: Justus (1978); Hennessey (1977); Koeppl (1982), e Olinto (2001), demonstraram que a função de densidade de probabilidades de Weibull é um

modelo adequado para caracterizar a distribuição de velocidades do vento em diversas regiões, além de representar de maneira bastante aproximada o histograma de distribuição de velocidades.

No que se refere à turbulência do vento foi obtida dividindo o desvio padrão da velocidade do vento para cada período de um dia pela velocidade média registrada nesse período, a intensidade média de turbulência observada no local, foi $S = 0,55$, onde o mesmo tem influência sobre o fator de forma k , indicando a concentração de certo valor da velocidade do vento para o local.

Lopes (2011) avaliando um sistema eólico-elétrico de bombeamento de água no mesmo local do presente experimento no ano de 2010 verificou-se um comportamento semelhante, no qual, encontrou um valor de turbulência média anual de $S = 0,452$ e especificamente no mês de maio $S = 0,59$ valor muito próximo do encontrado nesse trabalho, o que pode-se configurar em uma maior confiabilidade dos dados analisados.

6.2 Curva de potência do aerogerador

Na Tabela 8, encontram-se os dados de potência da turbina eólica, calculados em função da tensão e corrente gerados pelo aerogerador, onde a potência média verificada foi de 146,10 W. Mesmo com a capacidade do aerogerador de disponibilizar potência nominal de 1000 W, a uma velocidade nominal de 9 m s^{-1} , não teve demanda de potência além de 370 W, que é a potência nominal necessária para acionar o conjunto motobomba.

Tabela 8 - Estatística descritiva básica dos valores de potência

	Potência
Número de Amostras	250
Média (Watts)	146,10
Desvio Padrão (Watts)	139,34
Variância	21857,64
Coeficiente de Variação (%)	92,91
Máximo	552,68
Mínimo	0,0
Simetria	1,17
Curtose	0,96

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Verifica-se que com relação à potência um desvio padrão de 139,34 W, e coeficiente de variação de 92,91 %, são valores altos que indicam uma dispersão em relação à média, porém normais, verificados através dos coeficientes de normalidade simetria e curtose, em que apresentaram os seguintes valores 1,17 e 0,96, respectivamente. De acordo com as recomendações de Oliveira (2010), considera que se os coeficientes apresentarem-se dentro do intervalo de -3 e 3, pode-se realizar a análise de variância, já que ocorreu uma distribuição normal dos dados avaliados.

No entanto, o resultado desses dois parâmetros estatísticos elevados pode ser devido à potência ser uma variável em função da velocidade do vento, visto que a mesma apresentar muito variação tanto em grande escala, como em pequena escala como já mencionado anteriormente, e ainda, por considerar a velocidade do vento ao cubo, pois a variação de 1 m s^{-1} no vento corresponde a uma variação cúbica na potência. Segundo Lopes (2011), a potência disponível no vento é proporcional ao cubo da sua velocidade, assim pequenas variações de sua velocidade representam grandes variações na potência disponível.

Minuzzi (2011) acrescenta ainda que uma pequena variação na velocidade do vento causa uma grande variação na potência de saída de uma turbina, pois de acordo com a equação de potência é possível observar que a energia disponível possui uma relação cúbica com a velocidade do vento, de forma que o dobro de velocidade representa um aumento de oito vezes em energia.

A análise de variância da potência, apresentada na Tabela 9, verifica-se pelo teste F que não houve diferença significativa entre as médias da potência calculada em função da multiplicação das variáveis obtidas tensão e corrente do aerogerador, com o período de dias a nível de 5 % de significância.

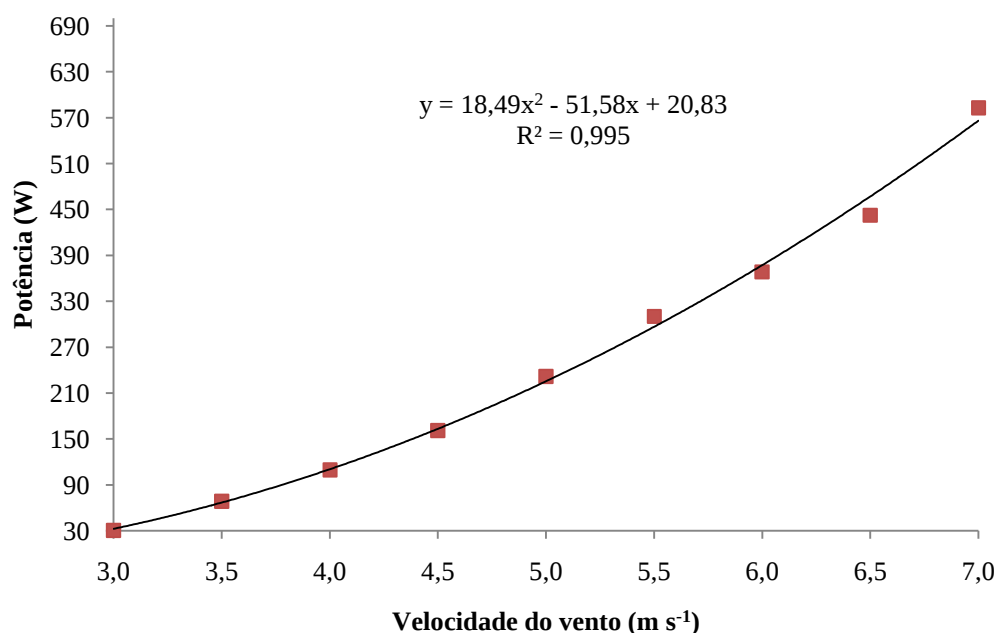
Tabela 9 - Análise de variância da potência

FV	DF	SS	MS	F	P
Fator	4	193.964	48.491	2,22	0,068
Erro	245	5.355.126	21.858		
Total	249	5.549.090			

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

A Figura 27 apresenta a curva de potência gerada, por meio do cálculo da multiplicação dos dados de tensão e corrente do aerogerador, obtidos através das medições, em função da velocidade do vento, em que pode-se perceber através do polinômio com função de segundo grau, que a potência é crescente, a medida que aumenta a velocidade do vento, mostrando uma forte correlação do aumento da potência com o incremento da velocidade, porém quando a mesma alcança a velocidade de corte, ocorre a frenagem da turbina eólica por medidas de segurança, e consequentemente a redução da potência gerada, caso que não ocorreu no presente estudo.

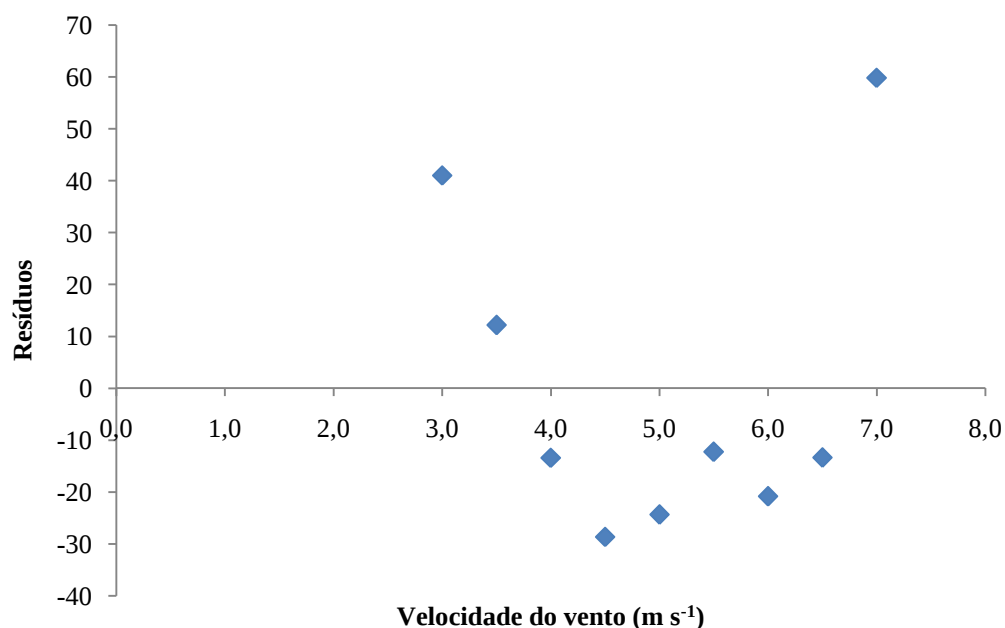
Figura 27 - Curva de potência do aerogerador em função da velocidade do vento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

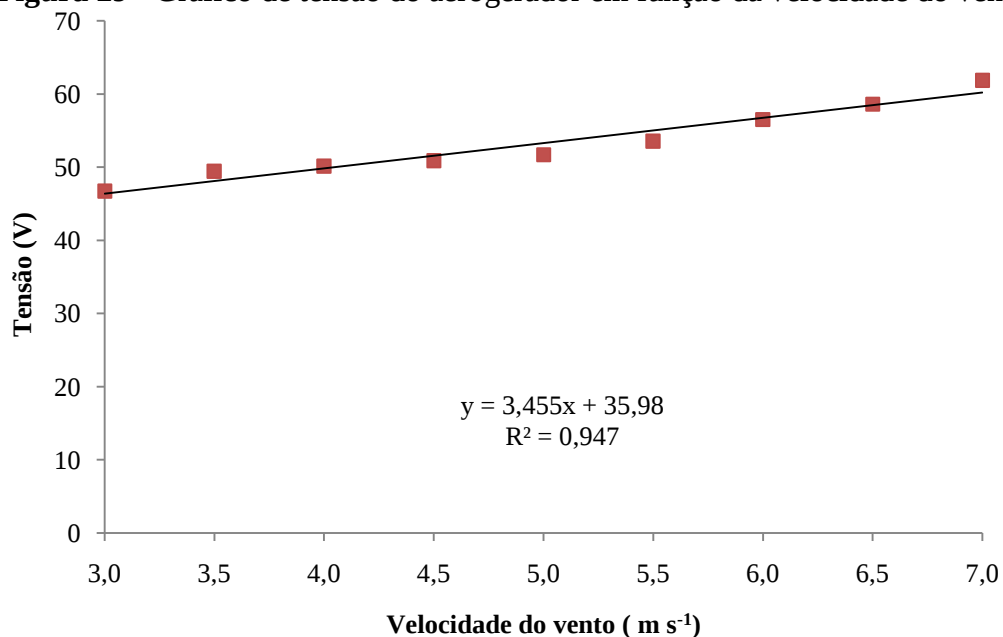
Conforme Manwell *et al.* (2002) a potência, fornecida por uma turbina eólica, varia com a velocidade do vento e cada turbina tem uma característica de desempenho designada curva de potência. E que com tal curva é possível prever a produção de energia de uma turbina sem ter em conta os detalhes técnicos dos seus vários componentes.

Na Figura 28 pode-se observar a análise de resíduos da potência em função da velocidade, onde verifica-se que os resíduos apresentaram um comportamento padronizado, e não aleatório, logo não há independência dos erros. Isso pode ter ocorrido devido a discrepância dos valores de potência medido e os valores de potência do fabricante visualizados na Figura 33.

Figura 28 - Análise de resíduos da potência versus velocidade

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O gráfico de tensão em função da velocidade do vento obtido por meio das medições durante o experimento é mostrado na Figura 29. Nesta calculou-se o valor médio da tensão para cada classe de velocidade do vento, a partir de 3 m s^{-1} , velocidade na qual iniciava a geração de energia, até 7 m s^{-1} velocidade média máxima observada quando o sistema estava em operação.

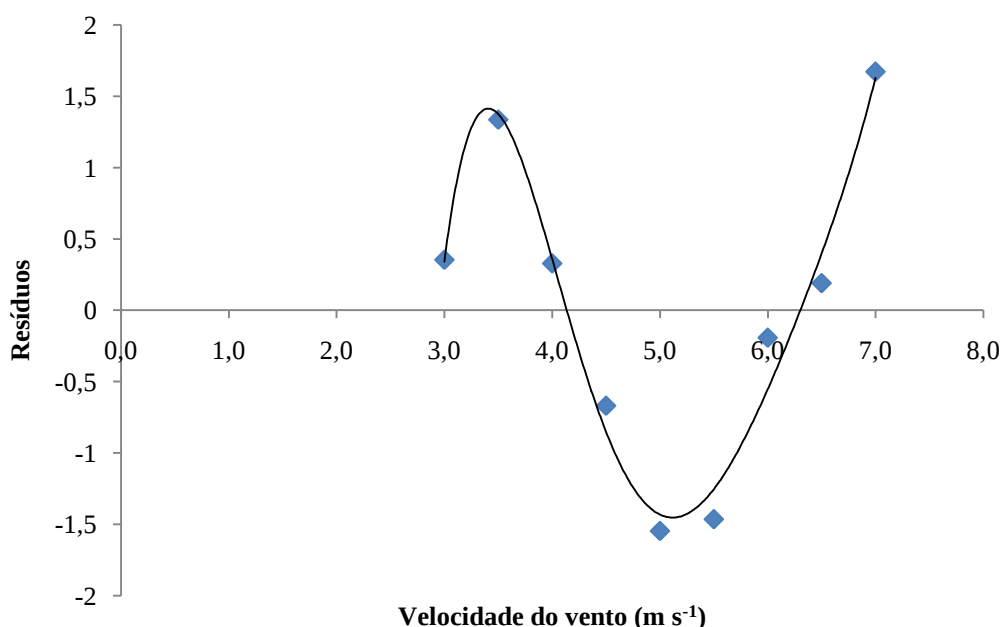
Figura 29 - Gráfico de tensão do aerogerador em função da velocidade do vento

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Portanto, através deste gráfico pode-se observar que a tensão gerada não ocorreu tanta variação em função da velocidade do vento, pois a mesma permanece praticamente constante com uma pequena escala de variação durante a operação, com a maior diferença observada entre o valor mínimo e máximo. Além disso, por meio da equação observa-se uma forte correlação das variáveis estudadas.

Já na Figura 30 é observada a análise de resíduos da tensão versus a velocidade do vento, em que o gráfico de resíduos mostra que o modelo de regressão linear simples está adequado, pois verifica-se uma distribuição com um comportamento padronizado em que o polinômio de função do quinto grau descreve o comportamento dos dados em torno da reta x.

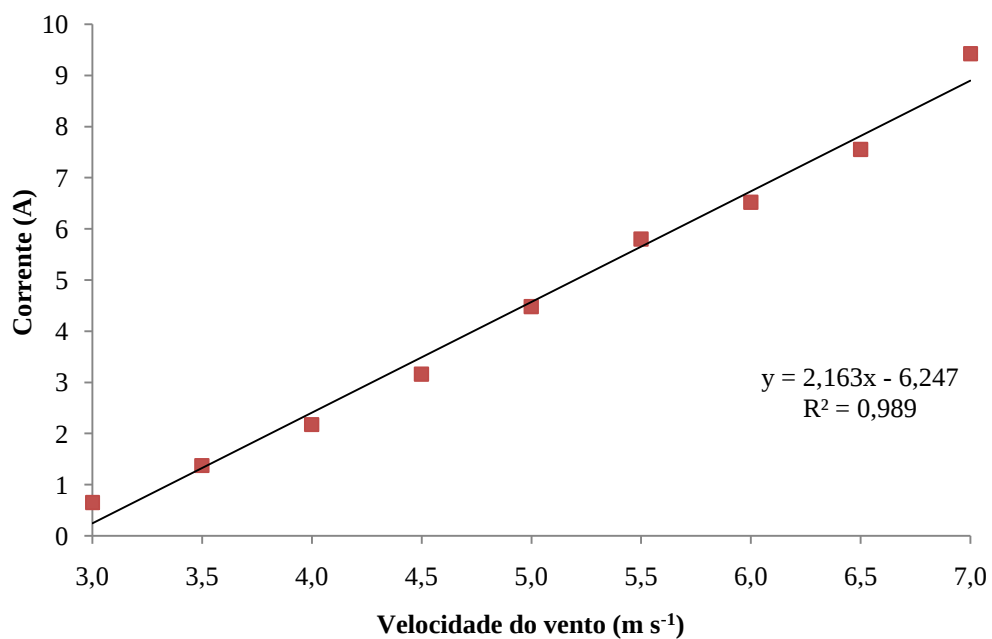
Figura 30 - Análise de resíduos da tensão versus velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Com relação à curva da corrente do aerogerador, observa-se, no entanto, uma maior variação dos valores, em função da velocidade do vento, crescendo na medida em que a velocidade do vento aumenta, conforme é mostrado na Figura 31. Também, calculou-se o valor médio da corrente para cada classe de velocidade do vento, no qual pode-se verificar a variação da corrente com a velocidade do vento, como evidenciado pelo crescimento acentuado da reta a cada intervalo de velocidade.

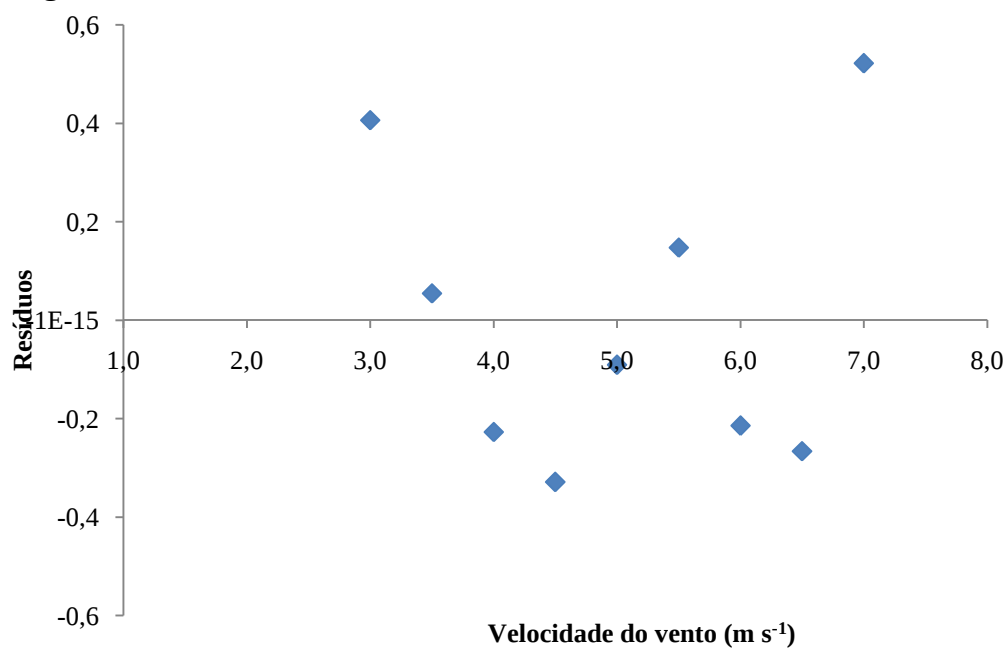
Figura 31 - Curva da corrente do aerogerador em função da velocidade do vento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

A Figura 32 mostra o gráfico de resíduos, onde pode-se observar uma distribuição de forma aleatória, sustentando a independência dos erros, em que os mesmos possuem uma distribuição normal, quando todos os pontos dos gráficos encontram-se posicionados mais ou menos próximo da reta, indicando que a análise de regressão linear simples da corrente é válida para representa o modelo.

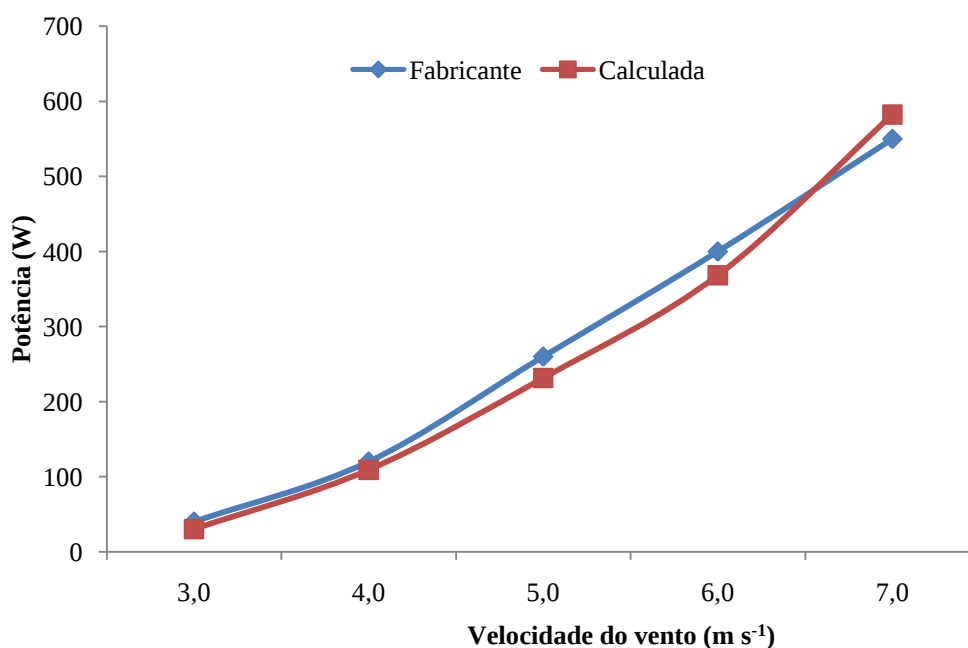
Figura 32 - Análise de resíduos da corrente versus velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Na Figura 33 é apresentada a curva de potência calculada a partir dos dados medidos e curva de potência do fabricante do aerogerador. Por meio destas curvas é possível observar que os valores de potência fornecidos pela curva do fabricante são próximos dos valores de potência verificados na prática para as mesmas velocidades do vento. Entretanto apresenta maiores diferenças no intervalo de velocidades do vento de 4,5 a 6,5 m s^{-1} .

Figura 33 - Comparação da curva de potência calculada versus fabricante



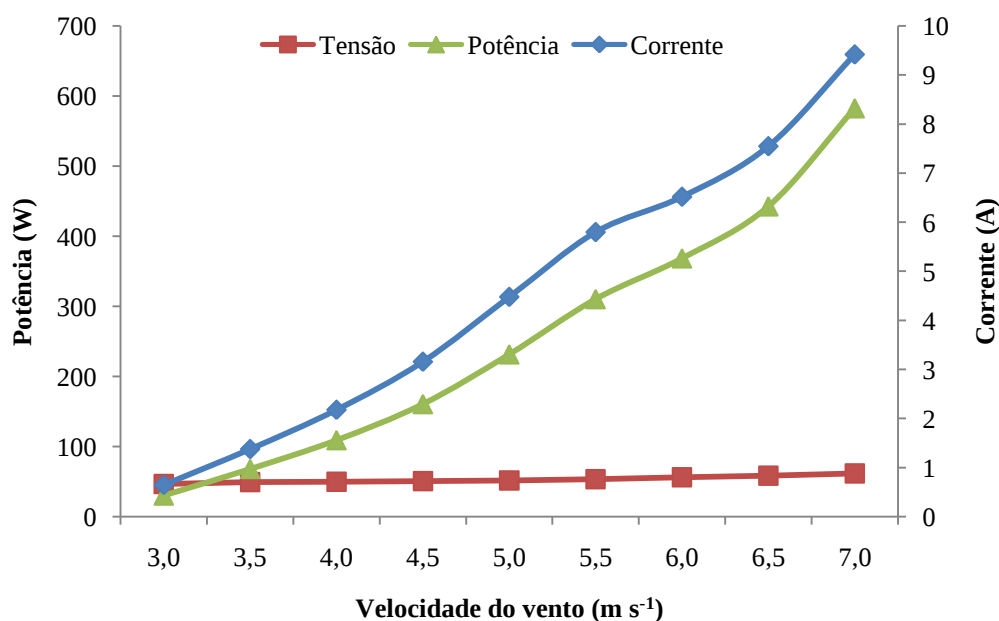
Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

De acordo com Nascimento (2012), diversos fatores influenciam no desempenho dos aerogeradores, no entanto, os parâmetros mais importantes a serem considerados para a determinação da capacidade dos aerogeradores são a velocidade do vento, o diâmetro do rotor e o coeficiente de potência. Destes parâmetros, a velocidade do vento é o mais significativo, já que a potência que pode ser convertida pelo aerogerador tem uma variação cúbica com a velocidade do vento, durante o processo de conversão da energia cinética em energia mecânica de rotação.

Fonseca *et al.* (2014) acrescentam ainda com o seu trabalho com relação ao ângulo de pitch no desempenho de aerogeradores de pequeno porte, em que concluiu que para certos intervalos de velocidade específica de 1-2 e 4-6 não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias, o que implica que a variação do ângulo de pitch não causa variação no desempenho da turbina nesses intervalos de λ . Porém nos intervalos 2-3 e 3-4 houve diferença entre as médias, o que implica alteração no desempenho do aerogerador ao se alterar o ângulo pitch.

Contudo, quando analisa-se, a Figura 34 no qual estão representadas as curvas de potência, tensão e corrente todas em função da velocidade do vento, verifica-se a variação da potência disponível no vento, considerando-se pequena a variação com relação à densidade específica do ar. Porém efeito contrário com relação à velocidade, já que a potência varia linearmente com a densidade e cresce com o cubo da velocidade, e também possui uma relação proporcional à área do rotor.

Figura 34 - Curvas de potência, tensão e corrente em função da velocidade do vento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Observa-se ainda que a curva de tensão permanece praticamente constante, ao contrário da corrente que apresenta uma variação significativa com o aumento na velocidade do vento. Segundo Acunha Junior (2006) no seu trabalho com o desempenho de aerogerador de pequeno porte percebeu-se que a tensão gerada não tinha dependência direta com a velocidade do vento, pois permanecia praticamente estável durante a operação, com a maior

diferença entre os valores máximo e mínimo sendo menor que 1,0 V, dependendo apenas do estado de carga das baterias. Já com relação à corrente, observou-se, no entanto, dependência direta com a velocidade do vento, ou seja quanto maior a velocidade do vento maior era a corrente.

Vale ressaltar que a potência gerada é diferente em cada aerogerador, e é um parâmetro de fundamental importância, pois é por meio da sua análise que podemos avaliar e quantificar alguns desvios no que se refere ao comportamento da curva característica do aerogerador, no qual está relacionada diretamente com a energia gerada.

6.3 Volume de água bombeado

Com relação à vazão do sistema de bombeamento para quantificação do volume que foi bombeado para possivelmente utilização na irrigação, a Tabela 10 mostra a análise descritiva para os dados obtidos no experimento tendo uma vazão média de $0,50 \text{ L s}^{-1}$, considerando dados do fabricante do conjunto motobomba em que menciona valores de vazão no intervalo de $0,50$ a $0,58 \text{ L s}^{-1}$ com alturas manométricas de 6,5 mca e 3,0 mca respectivamente, sendo que no presente trabalho a AMT (Altura Manométrica Total) foi de 4,50 mca.

Tabela 10 - Estatística descritiva básica dos valores de vazão do sistema

	Vazão do sistema
Número de Amostras	250
Média (L s^{-1})	0,50
Desvio Padrão (L s^{-1})	0,075
Variância	22,22
Coeficiente de Variação (%)	15,16
Máximo	0,669
Mínimo	0,314
Simetria	-0,28
Curtose	0,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Pode-se ainda observar um desvio padrão de $0,075 \text{ L s}^{-1}$ e um coeficiente de variação de 15,16 %, e também no que se refere aos parâmetros estatísticos de normalidade os coeficientes de simetria e curtose estão dentro do intervalo mencionado por Oliveira (2010).

Segundo Albiero (2010) é válido salientar que quanto maior o número de amostras, mais a distribuição se aproxima de uma normal, fato que pode ser observado pelo total de amostras que foram utilizadas para a realização desse experimento. Isso foi possível em função do planejamento estatístico que foi adotado para determinar o número de amostras ideal, que possibilitaria que os dados avaliados obtivessem normalidade.

Na Tabela 11 apresenta os dados da análise de variância, verifica-se pelo teste F que houve diferença significativa entre as médias das vazões com o dias analisados a nível de 5% de significância.

Tabela 11 - Análise de variância da vazão do sistema de bombeamento

FV	DF	SS	MS	F	P
Fator	4	1239,8	309,9	9,22	0,000
Erro	462	15.532,5	33,6		
Total	466	16.772,2			

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

No volume de água bombeado, bem como na vazão do sistema ocorreu uma pequena variação, uma vez que determinado a AMT, considerando as perdas de carga do sistema, a bomba tem uma vazão específica teoricamente constante para esse fator dimensionado. Porém no presente estudo a AMT foi calculada de forma que se manteve um valor constante, e mesmo assim mostrou-se uma pequena variação da vazão, visualizada por meio do coeficiente de variação. Esse fenômeno possivelmente ocorreu devido à frequência aplicada ao motor, uma vez que a rotação do motor está diretamente relacionada com a frequência.

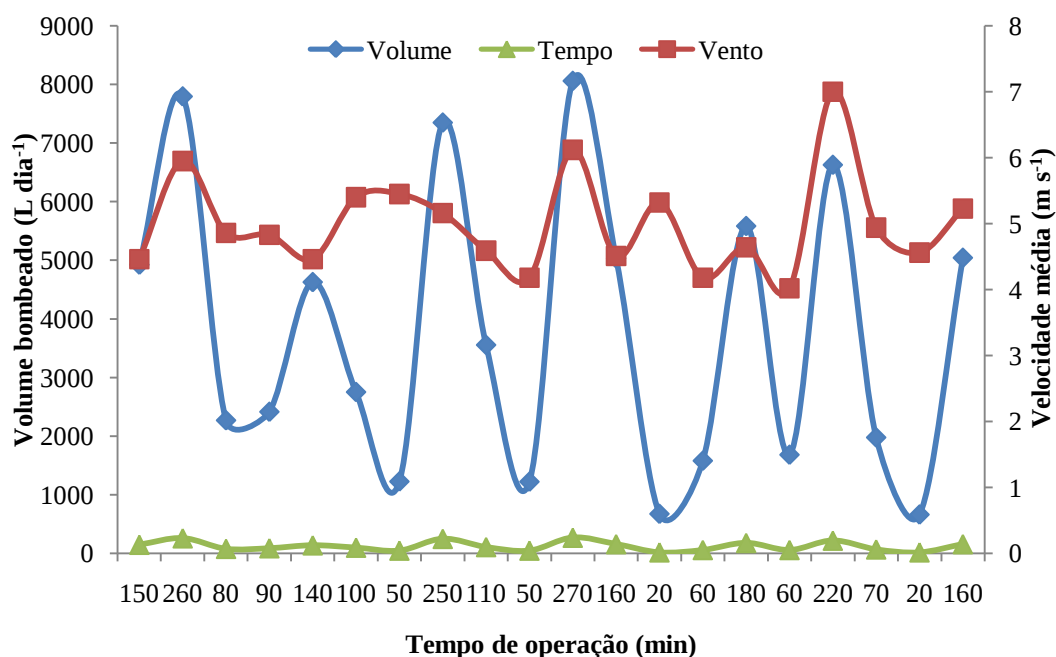
Conforme Sousa Neto, (2003), o rendimento do sistema de bombeamento está relacionado à potência absorvida pelo motor e à potência hidráulica cedida ao líquido. Já Lopes, (2011) acrescenta que a vazão também depende da medida da válvula de sucção, da configuração da tubulação estabelecida pelas válvulas de elevação e da rotação da bomba. O mesmo em seu trabalho analisou diferentes frequências aplicadas ao motor de 30 a 65 Hz que corresponde a uma variação de rotação do impulsor da bomba de 1725 a 3738 rpm, respectivamente, concluindo que o valor da vazão na saída da bomba é proporcional à

velocidade de rotação do rotor da bomba e da configuração estabelecida para o circuito hidráulico.

Segundo Nascimento (2012) observou que os valores de vazão apresentaram diferenças significativas quando comparados. Isto se deve ao fato de que nem toda a potência fornecida pelo aerogerador é entregue à bomba, pois o inversor de frequência trabalha em uma determinada faixa de tensões, e para determinados valores de potência a tensão necessária para que o inversor funcione não é suficiente.

Na Figura 35 verifica-se o volume de água bombeado em função da velocidade média do vento, e seu respectivo tempo de operação, onde têm-se uma média de 3750,5 L dia⁻¹, a uma velocidade média de 4,99 m s⁻¹, com um tempo de operação de 125 minutos.

Figura 35 - Volume de água bombeado em função da velocidade média do vento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Observa-se também que o melhor desempenho do sistema ocorreu no dia 23 de maio, em que a velocidade média do vento foi de 6,12 m s⁻¹ e o volume de água bombeado atingiu a marca de 8057 L dia⁻¹, mesmo com uma velocidade média menor que o dia 30 de maio, possivelmente devido à maior permanência de uma velocidade satisfatória, pois teve maior tempo de operação, e também pode ser em função da faixa de tensões entregue a bomba por meio do inversor.

Leão Filho (2007) em seu estudo com o uso de geradores eólicos de pequeno porte para irrigação de um plantio de goiaba no semiárido do estado de Sergipe no município de própria, através da curva de bombeamento da água, constatou-se que com uma velocidade de $6,39 \text{ m s}^{-1}$, o catavento dimensionado teve a capacidade de bombear até $42.000 \text{ L dia}^{-1}$, foram então 1750 L h^{-1} de água bombeada.

Krauter, (2005) considera que ventos com velocidade acima de 3 m s^{-1} , como viáveis para o bombeamento com sistemas eólicos. Possivelmente, o bombeamento seria útil para uso em menores volumes, como exemplo, na produção animal e no uso urbano.

6.4 Pressão hidráulica do sistema

Na Tabela 12 encontra-se a estatística básica descritiva da pressão do sistema de bombeamento, onde apresentou à média 3,34 mca, desvio padrão de 0,66 mca e coeficiente de variação de 20,01 %, e coeficientes de normalidade simetria e curtose de -0,92 e -0,05, respectivamente.

Tabela 12 - Estatística descritiva básica dos valores de pressão do sistema hidráulico

Pressão hidráulica	
Número de Amostras	250
Média (mca)	3,34
Desvio Padrão (mca)	0,66
Variância	0,45
Coeficiente de Variação (%)	20,01
Máximo	4,05
Mínimo	1,80
Simetria	-0,92
Curtose	-0,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Considerando o sistema de irrigação instalado no qual o bombeamento d'água é realizado diretamente para a área irrigada, a importância do monitoramento da pressão do sistema está diretamente relacionada com manejo da irrigação, em que a alteração desse parâmetro tem influência significativa no coeficiente de uniformidade de distribuição da água

pelos emissores, diminuindo a eficiência do sistema de irrigação. Sendo assim, a vazão do sistema de bombeamento depende também da pressão disponibilizada pela bomba.

Com relação à análise de variância descrita na Tabela 13 referente à pressão do sistema pode-se constatar que houve diferença significativa entre as médias da pressão e os dias avaliados a nível de 5 % de significância.

Tabela 13 - Análise de variância da pressão hidráulica do sistema de bombeamento

FV	DF	SS	MS	F	P
Fator	4	6,364	1,591	3,54	0,008
Erro	245	110,076	0,449		
Total	249	116,439			

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

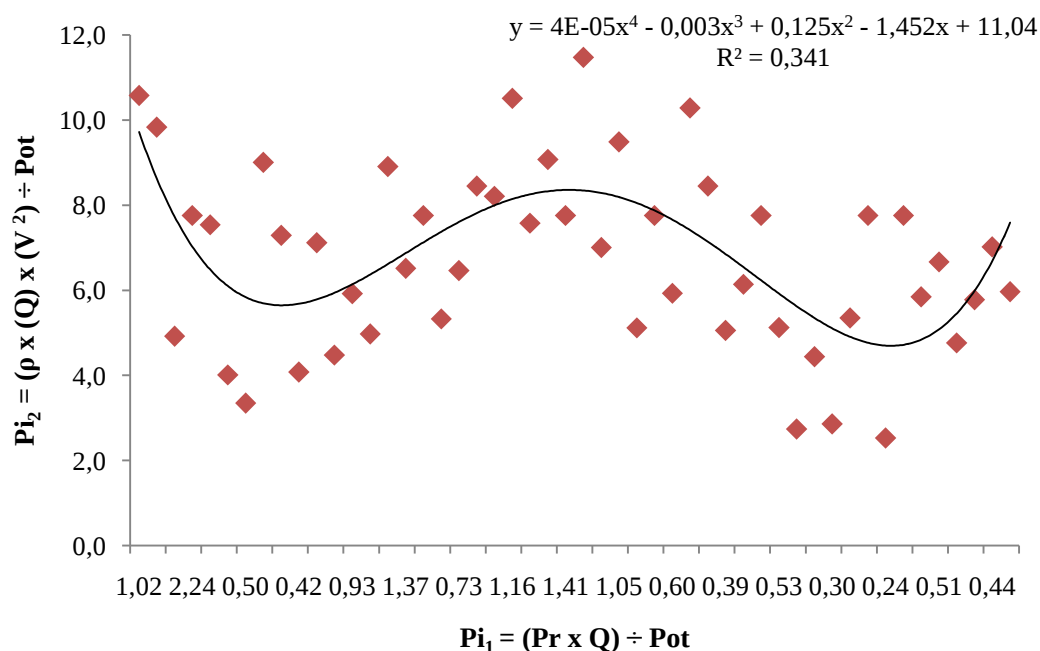
Portanto, a pressão fornecida pela bomba apresentou-se variável, observado pelo coeficiente de variação, que pode ser devido à rotação do motor e à vazão do sistema. Segundo Faria *et al.* (2002) em seu estudo sobre entupimento de gotejadores e seu efeito na pressão da rede hidráulica de um sistema de microirrigação, constatou-se que houve grande incremento de pressão em uma situação, onde o sistema operou com redução de vazão e rotação original do sistema motobomba, e quando se simulou a redução de rotação do sistema motobomba, verificou-se redução da pressão na malha hidráulica.

Dessa forma, a determinação dessa variável torna-se necessária para o sistema eólico de bombeamento, uma vez que a mesma está relacionada com a rotação do motor, conseqüentemente, essa variação de rotação do motor influencia diretamente na demanda de energia do sistema eólico.

6.5 Análise dimensional

A análise dimensional do problema em questão no que se refere à geração eólica no bombeamento de água foi realizada de maneira formal com o uso do Teorema metodológico de BUCKINGHAN. Esta análise permitiu a determinação de grupos adimensionais relevantes ao problema em questão, onde os Pi-termos 1 e 2 perfazem um gráfico adimensional que possibilita avaliar o ponto ótimo e a característica intrínseca deste fenômeno geração eólica para o bombeamento de água apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Gráfico adimensional dos Pi_1 x Pi_2 para o experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Pode-se observar que existe um ponto máximo, portanto este é o ponto crítico que tem que ser analisado ou otimizado, conhecendo as interações das variáveis físicas dos Pi -termos, e sua relação com o problema em questão, também determinando os parâmetros principais, e a correlação intrínseca de cada um para a contribuição do ponto ótimo.

Observou-se que a velocidade do vento pode ser considerada como a unidade física principal do problema, em que todas as outras unidades estão diretamente ou indiretamente relacionadas com a mesma, onde a variação do vento implica uma mudança de cenário em todo o fenômeno. Conforme Días (2012), a análise das variáveis e parâmetros que governam um fenômeno permitem encontrar relações entre as variáveis que formam parâmetros adimensionais.

Verificou-se que a densidade do ar dimensionado no Pi_2 ocorreu pouca variação dentre as amostras de cada repetição, devido às pequenas variações na temperatura do ar. Já com relação à velocidade do vento, quando a mesma aumenta, ocorre aumento de potência, consequentemente acionamento do sistema de bombeamento, maior vazão, e por fim alguma variação na pressão em função da vazão e da potência impulsionada no motor. No entanto, estas duas contribuições atuam em sentidos diferentes de significância, uma vez que a

velocidade diminui ou aumenta mais rapidamente do que a densidade. Isso explica o porquê a velocidade do vento é o fator determinante na correlação com as outras variáveis para o fenômeno.

Segundo Mesa Pérez, (2004) afirmou mediante essa análise podem ser deduzidas informações acerca de um determinado fenômeno, considerando-se que certo fenômeno pode ser descrito por uma equação dimensionalmente correta entre certas variáveis que influenciam no sistema.

Neste enfoque percebe-se pela Figura 36, que o melhor comportamento foi relativo às amostras da terceira repetição no ponto 1,16 e 11,468 referentes aos Π_1 e Π_2 respectivamente, que apresentou o ponto máximo, em um comportamento crescente enquanto sua densidade do ar permaneceu praticamente constante, e que teve um comportamento idêntico nos outros dados obtidos. Estas observações apresentaram uma característica interessante de que nem sempre o maior valor de uma variável implicará em uma vantagem para o sistema, pois verifica-se que nos dados da terceira repetição constataram-se valores de potência menores que nas outras, e mesmo assim ao final demonstrou ser mais favorável na determinação do ponto ótimo de operação do sistema, possivelmente devido a menor variação da potência ou dos parâmetros que governam a mesma, especificamente a velocidade do vento.

De acordo com Albiero (2006) a análise dimensional capta as diferenças entre tratamento com maior precisão e menor trabalho, e os dados obtidos são tratados através de Π -termos que são fatores adimensionais invariantes, ou seja, têm comportamentos constantes sem função de características específicas do fenômeno, o que representa comportamentos inter-relacionados entre parâmetros independentes linearmente, que possibilitam a quantificação proporcional de suas variações em função de suas propriedades.

6.6 Viabilidade econômica

Na realização da viabilidade econômica foi utilizado o software Retscreen e como resultado também é apresentado à exemplificação da operacionalização do mesmo. A Figura 37 apresenta a tela inicial do programa, em que são inseridos dados referentes à localização, o método de análise, e o tipo de projeto que está sendo simulado.

Figura 37 - Tela inicial do software Retscreen



The screenshot shows the initial screen of the RETScreen International software. At the top, there is a header with the Natural Resources Canada logo and the text 'Natural Resources Canada' and 'Ressources naturelles Canada'. Below this is a blue banner with the RETScreen International logo and the website 'www.retscreen.net'. Underneath the banner is a dark blue bar with the text 'Software de Análise de Projetos de Energia Limpa'. The main content area is a white box with the title 'Informação sobre o projeto' and a link 'Veja banco de Dados do projeto'. The form contains several fields for project information:

Nome do Projeto	ENERGIA EÓLICA
Localização do Projeto	FORTALEZA - CE
Preparado para	DISSERTAÇÃO
Preparado por	ERIALDO OLIVEIRA
Tipo de projeto	Produção de eletricidade
Tecnologia	Turbina eólica
Tipo de grid	Rede Central
Tipo de análise	Método 1
Poder calorífico de referência	Poder calorífico superior (PCS)
Ver parâmetros	☐

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

A Figura 38 apresenta a segunda etapa da simulação, onde buscou-se em um banco de dados do próprio programa as condições de referência para o local em estudo como velocidade do vento, temperatura, pressão e etc, ou inseri-se essas informações.

Observa-se ainda na Figura 38 as informações das variáveis do local do presente estudo, sendo a velocidade do vento a variável de maior importância para a viabilidade econômica do sistema eólico. Entretanto, tratando-se de estudo de viabilidade econômica, quanto maior o tempo de medição dessa variável melhor caracteriza a afirmação de potencial viável ou não do ponto de vista econômico, portanto foi utilizada uma série histórica de 30 anos de observação compreendendo o período de 1983 a 2013 dos dados de vento medidos na estação meteorológica de Fortaleza, os quais são medidos e armazenados pelo INMET. Posteriormente foram calculados valores médios mensais dos 30 anos, e finalmente inserido no programa.

Figura 38 - Condições de referência para o local em estudo

	Unidade	Localização dos dados climáticos	Localização do Projeto
Latitude	°N	-3,8	-3,8
Longitude	°E	-38,6	-38,6
Elevação	m	26	26
Temperatura para projeto de aquecimento	°C	23,1	
Temperatura para projeto de refrigeração	°C	32,1	
Amplitude da Temperatura do Solo	°C	4,6	

Mês	Temperatura do Ar	Humidade relativa	Radiação solar diária - horizontal	Pressão Atmosférica	Velocidade do Vento	Temperatura do Solo	Graus-dia para aquecimento	Refrigeração graus-dias
	°C	%	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Janeiro	27,3	78,0%	5,33	101,2	3,7	27,8	0	536
Fevereiro	26,7	79,0%	5,14	101,2	3,1	27,9	0	468
Março	26,3	84,0%	4,67	101,2	2,6	27,9	0	505
Abril	26,5	85,0%	4,53	101,2	2,9	27,9	0	495
Mai	26,3	82,0%	5,03	101,3	3,7	27,7	0	505
Junho	25,9	80,0%	5,00	101,4	5,1	27,3	0	477
Julho	25,7	80,0%	5,69	101,5	5,6	27,3	0	487
Agosto	26,1	75,0%	6,19	101,5	6,3	28,1	0	499
Setembro	26,6	74,0%	6,25	101,4	6,7	28,4	0	498
Outubro	27,0	73,0%	6,47	101,3	6,3	28,8	0	527
Novembro	27,2	74,0%	6,36	101,2	5,8	28,7	0	516
Dezembro	27,3	76,0%	6,06	101,2	4,6	28,3	0	536
Anual	26,6	78,3%	5,56	101,3	4,7	28,0	0	6.050
Medido a	m				10,0	0,0		

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Nas Figuras 39 e 40 é apresentado o modelo energético, onde a primeira mostra os dados técnicos do sistema de geração de eletricidade, bem como a tecnologia, a quantidade de aerogeradores, fabricante, modelo, o preço, e o fator de utilização que pode ser considerado o mais importante nesta etapa da simulação, pois o mesmo tem influência direta na viabilidade econômica do sistema, uma vez que está relacionado com quantidade de energia produzida pela turbina eólica.

Figura 39 - Modelo energético do caso proposto, produção de eletricidade

Sistema de eletricidade do caso proposto		
Tecnologia	Turbina eólica	
Tipo de análise	☒ Método 1 ☐ Método 2 ☐ Método 3	
Turbina eólica		
Potência elétrica	kW	1,0
Fabricante	HUMMER	
Modelo	H3.1-1KW	
Fator de Utilização	%	32,5%
		1 unidade(s)
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	3
Preço eletricidade exportada	\$/MWh	189,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Dutra (2001) afirmar que o custo da instalação de uma usina eólica é determinado pela capacidade instalada, em que a receita de geração líquida deve levar em consideração o fator de capacidade do parque eólico.

O fator de capacidade de 32,5% foi calculado por meio da produção de energia pelo aerogerador na velocidade média do vento, encontrado no presente estudo, dividindo pela produção teórica máxima do aerogerador funcionando em sua velocidade nominal, considerando a produção anual, ou seja, 8760 horas de operação.

Dutra e Guedes (2012) em um levantamento na Região Nordeste apresentam valores que tornam competitivos os investimentos na geração eólica de pequeno porte utilizando aerogeradores nacionais instalados em locais com fator de capacidade superiores a 20%.

O resultado da simulação da viabilidade econômica no que se refere a análise financeira pode ser observado na Figura 40, onde o software mostra os parâmetros financeiros do caso em questão, em que o custo do sistema eólico foi R\$ 11.500,00 incluindo sua instalação, representando aproximadamente 80% do investimento, e os outros 20% correspondendo ao banco de baterias, manutenções do sistema e demais componentes necessários.

Figura 40 - Modelo energético do caso proposto, análise financeira

Análise Financeira			
Parâmetros financeiros			
Taxa de inflação	%	5,5%	
Vida do projeto	ano	20	
Razão da dívida	%	0%	
Custos iniciais			
Sistema de produção de eletricidade	\$	11.500	79,7%
Banco de baterias	\$	2.925	20,3%
Total de custos de investimento	\$	14.425	100,0%
Incentivos e subsídios	\$	0	0,0%
Pagamento anual de custos e empréstimos			
Custo (economia) de O&M	\$	100	
Custo combustível - caso proposto	\$	0	
	\$	0	
Total de custos anuais	\$	100	
Economia anual e receita			
Custo combustível - caso de referência	\$	0	
Receita com eletricidade exportada	\$	538	
	\$	0	
Total de economia e receita anual	\$	538	
Viabil. Financeira			
TIR antes impostos - ativos	%	0,9%	
Retorno simples	ano	32,9	
Retorno do capital próprio	ano	18,7	

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

EWEA (2009) encontrou valores próximos, onde menciona que o valor do investimento composto do custo da máquina, estimado em 75% do total, e do custo relacionado a estudos e projetos, obras e instalações do aerogerador, torre, inversor elétrico e demais componentes necessários para funcionamento do sistema eólico, estimados em 25% do total.

Verifica-se com relação aos indicadores econômicos uma TIR de 0,9% e o *payback* de 18,7 anos, valores intrínsecos ao projeto e não dependentes de nenhum outro parâmetro que não os fluxos de caixa esperado do projeto, onde observa-se um valor muito baixo da TIR ao contrário o *payback*. Isso significa que apesar do retorno do investimento se dar a uma taxa positiva, porém vale ressaltar muito baixa, em que a mesma encontra-se abaixo da taxa de 5% que é considerada boa para investimento na agricultura. Portanto, pode-se dizer que o retorno obtido não é suficiente para tornar o investimento viável nessa situação.

Conforme Pena *et al.* (2011) a TIR e o *payback* são cruciais para a avaliação econômica do sistema porque discriminam em que percentual ocorre a remuneração do capital investido. Portanto em todos os projetos de investimento que visarem a viabilidade econômica a TIR é indispensável como índice de decisão, principalmente porque relativiza numa taxa os ganhos ou as perdas do empreendedor.

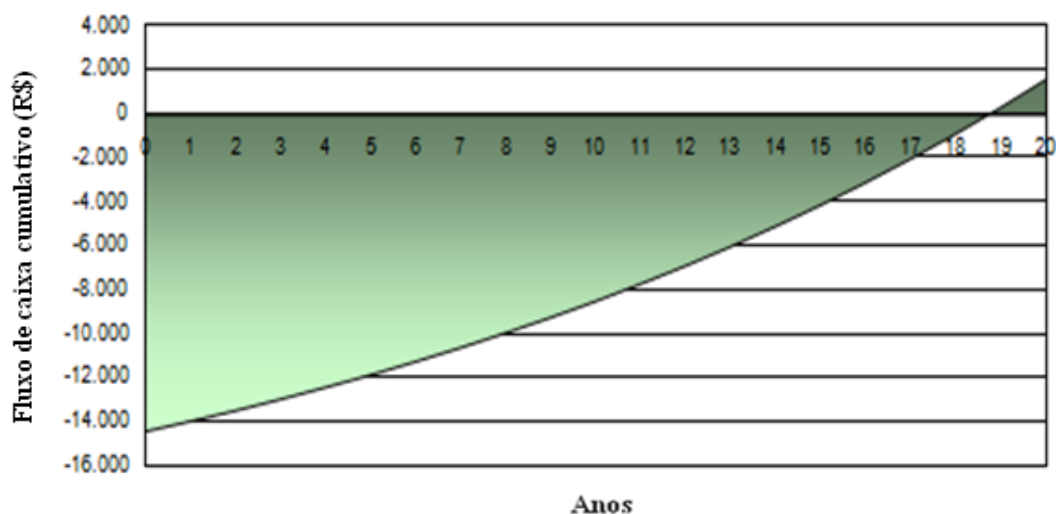
Vale salientar que os indicadores de viabilidade encontrados possivelmente apresentam valores desfavoráveis à viabilidade econômica devido às condições de vento, e também ao perfil aerodinâmico dos modelos de aerogeradores atuais do mercado não apresentarem desempenho satisfatório em baixas velocidade de vento, por isso a necessidade de mais estudos e pesquisas no sentido de melhorar o perfil aerodinâmico dos aerogeradores, para otimizar a sua aplicação em condições de baixo vento.

Segundo Anastácio *et al.* (2013) em seu estudo sobre análise do desempenho aerodinâmico das pás de turbina eólica de pequeno porte usando o perfil NREL S809 em várias velocidades de ponta, em que foi utilizado quatro conjuntos distintos de lâminas para os testes de desempenho, onde as mesmas apresentavam diferença uma das outras com relação ao valor da velocidade de ponta, sendo que os valores utilizados foram iguais a 6, 7, 8 e 9. No entanto, os autores verificaram pouca dependência do torque medido em função da velocidade específica de operação, o que é uma característica das turbinas de vento de alta velocidade, e como resultado que a lâmina com relação de velocidade de ponta 7 apresentou o melhor desempenho médio, obtendo um coeficiente máximo de desempenho igual a 31%.

Albiero *et al.* (2014) no desenvolvimento de turbina eólica com inovações tecnológicas para baixas velocidades de vento, onde concluíram que todos os sistemas foram conceituados e dimensionados, culminando em uma turbina eólica inovadora e adequada às necessidades a que se propôs atender: baixa velocidade do vento e agricultura familiar.

Considerando as informações das seções anteriores, a Figura 41 apresenta, através de um gráfico gerado pelo Retscreen, o fluxo de caixa cumulativo do caso proposto previsto para 20 anos, onde a partir das informações do fluxo de caixa, aplicam-se os métodos de engenharia econômica para análise de viabilidade financeira, TIR e *Payback*, em que observa-se o número de anos requeridos para se obter retorno sobre o capital investido inicialmente.

Figura 41 - Fluxo de caixa cumulativo do projeto



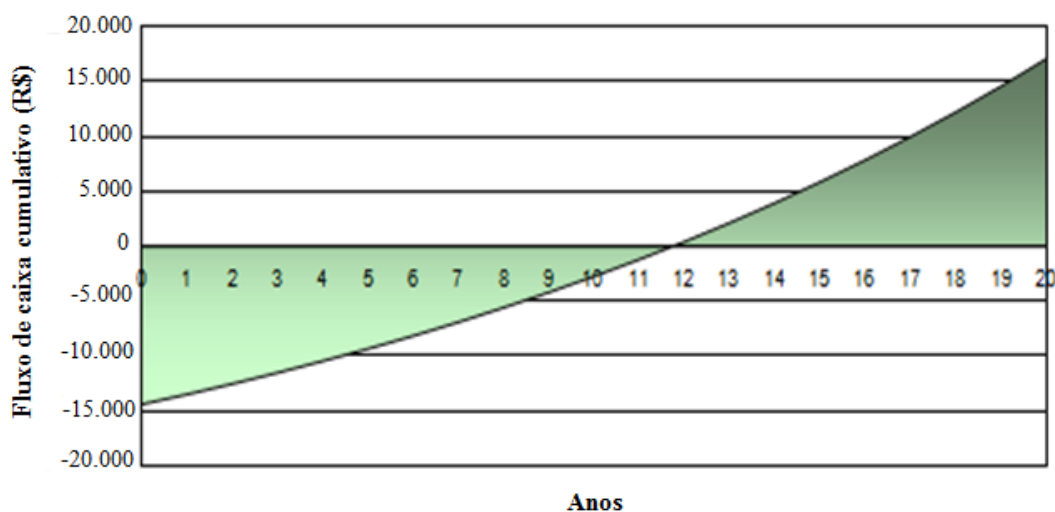
Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Os resultados obtidos demonstram que o sistema eólico pode ser viável como uma alternativa de geração de energia elétrica, uma vez que os indicadores econômicos apresentaram esta possibilidade. Porém não se sabe se é suficientemente econômico para remunerar o projeto em no mínimo o valor investido inicialmente, dentro do seu período de vida útil.

Conforme, Hiller (2012) em seu estudo de viabilidade técnica e econômica de instalação de um sistema de microgeração eólica conectado à rede elétrica em uma propriedade rural, observou sob a ótica do tempo de retorno (*Payback*), na alternativa sem compensação energética, e verificou que não são viáveis economicamente, pois o retorno começa somente após o 15º ano, ou seja, o fluxo de caixa é negativo durante $\frac{3}{4}$ do período considerado.

Na Figura 42, é simulada a viabilidade econômica do sistema eólico, o mesmo funcionamento apenas em sua velocidade nominal, ou seja, a 9 m s^{-1} , onde verifica-se por meio dos indicadores de rentabilidade uma TIR de 7,3% e o *payback* de 11,7 anos, indicando que na velocidade nominal o aerogerador apresenta um maior desempenho na geração de energia, com isso maior tempo de retorno do investimento.

Figura 42 - Fluxo de caixa cumulativo o aerogerador na velocidade nominal



Fonte: elaborado pelo autor (2014).

Portanto, a velocidade do vento redimensionado para esta condição 9 m s^{-1} , possivelmente teve maior geração de energia elétrica, o que possibilitou resultados satisfatórios com relação à viabilidade econômica e no atendimento de uma maior demanda de energia pelo sistema de bombeamento.

Segundo Vogt (2010) a transformação de energia eólica em elétrica é uma tecnologia que se tornou técnica e economicamente viável nos últimos 30 anos, enquanto a produção vem crescendo cerca de 20% ao ano. A energia eólica é uma fonte de energia limpa e disponível mundialmente em lugares com velocidades de vento maiores que 5 m s^{-1} .

Ramos e Seidler (2011) concluíram, estudando o aproveitamento de energia eólica em pequenos empreendimentos no estado do Rio Grande do Sul, que a energia eólica é uma fonte de energia renovável e limpa, que pode ser usada em pequena escala, para suprir as necessidades de pequenas propriedades com um baixo custo de manutenção e de forma ecologicamente sustentável.

Segundo esses mesmos autores, a partir das análises realizadas na estação de meteorologia entre os anos de 1989 a 1994, na universidade, conclui-se que a velocidade média dos ventos foi de $2,5 \text{ m s}^{-1}$, o que já permite a utilização de geradores de pequeno porte suprimindo a necessidade de energia em regiões remotas ou até mesmo auxiliando nos custos dos gastos com energia no processo produtivo.

Portanto, a energia eólica torna-se uma alternativa para pequenas propriedades agrícolas para acionamento de sistemas de bombeamento de água para irrigação na produção de alimentos nas pequenas áreas irrigadas da agricultura familiar, a qual depende principalmente do fator de capacidade que está diretamente relacionado à velocidade do vento para sua viabilização.

7. CONCLUSÃO

A energia eólica apresenta-se como uma boa alternativa para o agricultor familiar conviver com o semiárido, pois possibilitará o uso de energia renovável atrelada ao uso racional da água.

O volume de água bombeado pode ser usado na produção irrigada de hortículas da agricultura familiar e também seria útil na produção animal e próprio consumo humano.

O potencial eólico na geração de energia elétrica em condições de baixa velocidade do vento foi possível o acionamento do sistema de bombeamento. Porém o aerogerador não apresentou desempenho satisfatório em condições de baixo vento.

A interação das duas tecnologias, o sistema de geração de energia eólica e a irrigação, podem possibilitar o aumento da produtividade das culturas cultivadas pelo agricultor familiar.

E por fim com relação à viabilidade econômica a simulação dos indicadores de rentabilidade não apresentou resultados satisfatórios, devido ao período de baixas velocidades de vento, e o baixo desempenho do aerogerador em condições de pouco vento.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver mais trabalhos e pesquisas com relação ao perfil aerodinâmico dos aerogeradores, com a finalidade de melhorar rendimento da turbina eólica em condições de baixa velocidade do vento, principalmente no que se refere às turbinas de pequeno porte.

Analisar e quantificar as perdas de energia do sistema, devido às conversões de corrente do aerogerador com o inversor e carga, e estudar qual melhor eletrônica de potência que possa ser utilizada na ligação direta do aerogerador com carga, dispensando assim o uso de baterias.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, T.; SODER, L. An overview of wind energy-status 2002. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 6, 67-128 p. 2002.

ACUNHA JUNIOR, I. C. **Análise do desempenho de um aerogerador de pequeno porte**. 2006. 100 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande, Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. Rio Grande, 2006.

ALBIERO, D. **Avaliação do preparo de solo empregando o sistema de cultivo conservacionista em faixas com “Paraplow” rotativo usando análise dimensional**. 2006. 320 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, SP, 2006.

ALBIERO, D. **Desenvolvimento e avaliação de máquina multifuncional conservacionista para a agricultura familiar**. 2010. 244 p. Tese (Dourado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2010.

ALBIERO, D.; DAHER, S.; MONTEIRO, L. A.; CANAFÍSTULA, F. J. F. Turbina eólica para agricultura familiar do semiárido com inovações tecnológicas para baixas velocidades de vento. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 1, p. 186-196, Jan-Mar. 2014.

ALTOÉ, L.; OLIVEIRA FILHO, D. Utilização de sistemas fototérmicos com concentradores para higienização de salas de ordenha. **Revista Engenharia Agrícola**, v.30, n.5, p.799-810, 2010.

ALVAREZ, F. S. **Desenvolvimento de um sistema computacional para gerenciamento e análise de dados eólicos**. 2013. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Recife, 2013.

ALVES, J. J. A. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, SP, v. 6, n. 1, p. 165-188, Jan-Abr. 2010.

AMARANTE, O. A.; CAMARGO, B. M.; ZACK, J.; DE SÁ, A. L. **Atlas do potencial eólico Brasileiro**. Brasília, 2001.

ANASTÁCIO, J. R. B.; SOUSA, I. D. P.; ANDRADE, C. F.; TEIXEIRA, L. P.; ALBIERO, D.; COSTA ROCHA, P. A. Aerodynamic performance analysis of small wind turbine blades using NREL S809 profile and various tip speed ratios. In. International Congress of Mechanical Engineering (COBEM, 2013). Novembro 3-7, 2013, Ribeirão Preto, SP, Brasil. **Anais do XXII – COBEM**, 2013.

ANDRADE, D. V. **Avaliação hidráulica de tubos flexíveis de polietileno perfurados a laser utilizados na irrigação**. 1990. 147 p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

ANEEL – **Agencia Nacional de Energia Elétrica**. 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 05 Nov. 2013.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 11 Jun. 2013.

ARAÚJO, M. R. O. P. **Estudo comparativo de sistemas eólicos utilizando modelos probabilísticos de velocidade de vento**. 1998. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1998.

ARGAW. **Renewable energy for water pumping applications in rural villages**. New Mexico State University, New Mexico, 2003.

BANDEIRA JUNIOR, E. **Geração eólica: análise de investimento**. 2010. 64 p. Dissertação (mestrado) Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Área de concentração geração de energia elétrica. Porto Alegre, 2010.

BARGUES, J. P.; BARRAGAN, J.; RAMIRES DE CARTAGENA, F. Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration on microirrigation systems using dimensional analysis. **Biosystems Engineering**. v. 92, p. 383-390, 2005.

BELARMINO, F. Disponível em: <<http://diariodonordeste.globo.com/noticia.asp?codigo=326287&modulo=968>>. Acesso em: 13 Jun. 2013.

BOYLE, G. **Renewable Energy**. 2. ed. Oxford, 2004. 452 p.

BRAGA FILHO, W. **Análise Dimensional**, 1998. Disponível em: <<http://venus.rdc.puc-rio.br/wbraga/transcal/topicos/anadim.htm>>. Acesso em: 21 Jun. 2014.

BURGUEÑO, L. E. T.; SILVA, J. B. O uso da energia eólica no bombeamento d'água, em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 167-172, 2003.

CALDAS, D. M. **Estudo do potencial eólico e estimativa de geração de energia de um projeto eólico na cidade do Rio de Janeiro utilizando o WindPro e o WASP**. 2010. 81 p. Monografia. Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

CARVALHO P. **Geração Eólica**. Fortaleza, Imprensa Universitária, 2003.

CARVALHO, J. F. O espaço da energia nuclear no Brasil. **Estudos avançados**, v.26, n.74, p.293-308, 2012.

CBEE - Centro Brasileiro de Energia Eólica. **Geração de energia elétrica e o meio ambiente**. Disponível em: <www.eolica.com.br>. Acesso em: 10 Jan. 2013.

CBTTE – Centro Brasileiro de Testes de Turbinas Eólicas. **Testes de turbinas eólicas**, 2001. Disponível em: <<http://www.eolica.com.br>>. Acesso em: 17 Jun. 2013.

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Atlas do potencial eólico Brasileiro**. Brasília: Eletrobrás, 2001.

CERQUEIRA, W. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/brasil/energia-eolica-no-ceara.htm>>. Acesso em: 15 Jun. 2013.

COSTA, H. S. Tecnologia apropriada para a agricultura familiar sustentável do semi-árido brasileiro: bombeamento solar de água para irrigação localizada. **Energia e Meio Rural**. n. 6. 2006.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Tutorial de energia eólica**. 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_eolica.htm>. Acesso em: 10 Jun. 2013.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Tutorial energia eólica princípios e tecnologia**. 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica.htm>. Acesso em: 20 Jun. 2013.

CRESESB. **Energia eólica princípios e aplicações**. Disponível em: <http://paje.fe.usp.br/~mef-pietro/mef2/app.upload/7/_mefmi_003-05.pdf>. Acesso em: 13 Jun. 2013.

CUNHA, E. B. A. C.; LEAL JUNIOR, J. B. V.; ALMEIDA, G. P. Sensibilidade do modelo RAMS à parametrização de turbulência na simulação de vento em região serrana. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008, São Paulo. **Anais Eletrônicos**. Rio de Janeiro: SBMET, 2008.

CRUZ, R. V. **Integração da energia eólica na rede**: projeto de produção e planejamento de eletricidade. 2009. 67 p. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2009.

CUSTÓDIO, R. S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**, Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2009.

CUSTÓDIO, R. S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2007.

CUSTÓDIO, R. S. **Parâmetros de projetos de fazendas eólicas e aplicações específicas no Rio Grande do Sul**. 2002. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PUCRS, Porto Alegre. 2002.

DELGADO, C. G.; CARDOSO JÚNIOR, J. C. **Universalização de direitos sociais no Brasil: a previdência rural nos anos 90**. In: LEITE, S. (Org.). Políticas públicas e agricultura no Brasil. Porto Alegre: Ed. da Universidade – UFRGS, 2001. p. 225-249.

DENAULT, M; DUPUIS, D; COUTURE-CARDINAL, S. Complementarity of hydro and wind power: improving the risk profile of energy inflows. **Energy Policy**, v. 37, n. 12, p. 5376-5384, 2009.

DÍAZ, R. P. S. **Análise dimensional e simulação da transferência de calor e massa em reservatórios de gás natural adsorvido**. 2012. 184 p. Tese de Doutorado. PGMEC-Pós

graduação em Engenharia Mecânica Escola de Engenharia. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2012.

DUTRA, R. M. **Propostas de políticas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do PROINFA**. Tese de Doutorado em Planejamento Energético. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

DUTRA, R. M. **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico Brasileiro** [Rio de Janeiro] 2001XIII, 309 p. 29.7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Planejamento Energético) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

DUTRA, R. M.; GUEDES, V.G. **Evaluation of the new Brazilian regulation concerning low voltage distribution network: An Opportunity For Small Wind Turbines**. DEWEK. Bremen – Germany. 2012

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

DUTRA, R.; SZKLO, A. S. Hydro-wind power complementarity: a way to implementing wind power in Brazil. **Anais**. In: World Renewable Energy Congress X, 2008, Glasgow-Scotland. World Renewable Energy Congress. Glasgow, 2008. v. 1. p. 2344-2349.

ENGEMEP - Serviços de Manutenção Industrial e de Equipamentos de Extração de Petróleo Ltda. **Atração de investimento no Estado do Ceará**: mapa territorial de parques eólicos. Dezembro 2010, Fortaleza - Ceará – Brasil. Disponível em: <investimentos.mdic.gov.br/public/arquivo/arq1321639205.pdf>. Acesso em: 28 Out. 2013.

FARIA, L. F.; COELHO, R. D.; FLECHA, P. A. N.; ROBLES, W. G. R.; VÁSQUEZ, M. A. N. Entupimento de gotejadores e seu efeito na pressão da rede hidráulica de um sistema de microirrigação. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** v.6 n.2. Campina Grande. 2002.

FERREIRA, A. C. **Moinhos do Distrito de Aveiro**. Lisboa, 2006. 245-325 p.

FONSECA, M. R.; ARAÚJO, J. W. C.; CARNEIRO, W.F.S.; COSTA ROCHA, P. A.; ALBIERO, D.; ANDRADE, C. F. Influência do ângulo de pitch no desempenho de um aerogerador de pequeno porte projetado com perfil aerodinâmico NREL S809. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2014, Uberlândia. **Anais do VIII CONEM**, 2014.

FREITAS, K. M. **Energia eólica e o mecanismo de desenvolvimento limpo: estudo de caso na área costeira cearense**. 2010. 93 p. Monografia (Especialização em Desenvolvimento Econômico). Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Universidade Federal do Ceará. 2010.

FRONZA, D; SCHONS, R. **Fundamentos de irrigação e drenagem**. Santa Maria: Colégio Politécnico da UFSM, (Apostila didática). 2008.

GILEAD, G. Simple drip irrigation for developing countries. 7. ed. Telaviv. Israel: **International Conference on Water and Irrigation**, 1996.

GOOGLE EARTH. **Imagens de Fortaleza 2013**. Fortaleza-CE. Disponível em: <<http://www.google-earth.com.br/>>. Acesso em: 20 Ago. 2013.

GLOBAL WIND ENERGY OUTLOOK 2008. Disponível em: <www.gwec.net>. Acesso em: 30 Nov. 2013.

GRAH, V. F.; BOTREL, T. A.; PONCIANO, I. M.; DAMASCENO, A. P. A. B.; SALVADOR, C. A.; ALVES, D. G. Solução alternativa para bombeamento de água e automação da irrigação sem o uso de energia elétrica. **Irriga**, Botucatu, ISSN 1808-3765. Edição Especial, p. 309 - 323, 2012.

GUIMARÃES, J. H. D. **Aplicação da análise dimensional a fenômenos acústicos**. Tese de Doutorado, 2001. 120 p. Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro –RJ, 2001.

HENNESSEY Jr, J.P. Some aspects of wind power statistics. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, n. 2, p. 119-128, 1977.

HILLER, E. R. **Estudo de viabilidade técnica e econômica de instalação de um sistema de microgeração eólica conectado à rede elétrica em uma propriedade rural**. 2012. 26 p. Monografia. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, dezembro de 2012.

HUMMER - ANHUI HUMMER DYNAMO Co. Ltda. **Catálogo Hummer**. Disponível em: <www.brasilwindservice.com>. Acesso em: 10 Jun. 2013.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Censo agropecuário 2006: agricultura familiar**, primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 266 p.

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **NORM 61400-2:2006 – design requirements for small wind turbines**. London, 2006.

INATOMI T. H. **Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos**. Universidade de São Paulo (USP), 2005. Disponível em: <<http://www.cori.rei.unicamp.br/BrasilJapao3/Trabalhos2005/Trabalhos%20Completo/A nalise>>. Acesso em: 04 Maio 2013.

INAPI - Indústria Nordestina de Acessórios para Irrigação LTDA. **Bombas hidráulicas**. Disponível em: <www.imperiodasbombas.com.br/marcas/inapi>. Acesso em: 10 Jun. 2014.

JAIN, P. **Wind Energy Engineering**. XX: McGraw-Hill, 2011.

JUSTUS, C.G.; HARGRAVES, W.R.; MIKHAIL, A.; GRABER, D. Methods for estimating wind speed frequency distributions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, n. 3, p. 350-353, 1978.

KOLLING, E. M.; SAOUZA, S. N. M. de; ZANIN, A.; SIQUEIRA, J. A. C. Análise da capacidade e viabilidade econômica de sistemas alternativos de bombeamento de água, visando abastecimento de gado leiteiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26. **Anais...** Foz do Iguaçu. 2001. 16 p.

KOEPL, G.W. **Putnam's power from the wind**, 2. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

KRAUTER, S. **Usos da energia eólica**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LACERDA, N. B.; OLIVEIRA, T. S. Agricultura irrigada e a qualidade de vida dos agricultores em perímetros do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 216-223, 2007.

LAGE, A. C. **Administração pública orientada para o desenvolvimento sustentável. Um estudo de caso: os ventos das mudanças no Ceará também geram energia**. 2001. Dissertação (Mestrado em Administração Pública) – Escola Brasileira de Administração Pública, FGV, Rio de Janeiro. 2001.

LAGE, A. C; BARBIERI, J. C. **Avaliação de projetos para o desenvolvimento sustentável: uma análise do projeto de energia eólica do Estado do Ceará com base nas dimensões da sustentabilidade**. 2002. Disponível em: <http://www.fiec.org.br/artigos/energia/avaliacao_projetos_desenvolvimento_sustentavel_energia_eolica_ce.htm>. Acesso em: 15 Mai. 2013.

LANGARO, A. C; BALBINO T. R. **Viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização da energia eólica**. In: Semana de Estudos de Engenharia Ambiental 6. 2008. Irati: UNICENTRO, 2008. 14p.

LEÃO FILHO, A. D. **Uso de geradores eólicos de pequeno porte para irrigação no semiárido do estado de Sergipe**. 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2007.

LOPES, L. C. N. **Avaliação de sistema eólico-elétrico de bombeamento de água**. 2011. 171 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia. Fortaleza, 2011.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2. ed., Viçosa: Ed. UFV, 2007. 358 p.

MANWELL, J.F.; MCGOWAN, J.G.; ROGERS, A.L. **Wind energy explained**. New York: Wiley, 2002. 569 p.

MARINHO, M. H. N.; AQUINO, R. R. B. Oferta de Energia Através da Complementaridade Sazonal Hidro - Eólica. **PCH Notícias & SHP News**, n. 40, p. 24-28, 2009.

MARINHO, M. H. N.; CERQUEIRA, J. J. F. e MARTINEZ, L. Estudo da complementaridade hidro – eólica para regularização sazonal de energia elétrica. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2006). **Anais**. Campina Grande, Paraíba, Brasil. 2006.

- MARTINS F. R. **O aproveitamento da energia eólica**. Instituto nacional de pesquisas espaciais, São José dos Campos, SP, 2007. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/301304.pdf>>. Acesso em 23 Jun. 2014.
- MARTINS, J. **A Força dos Ventos**. O Setor Elétrico, São Paulo. Dezembro de 2011, v. 6, n. 71, p. 46-53.
- MESA PÉREZ, J. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critério para sua otimização**, 2004. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- NASCIMENTO, M. A. S. **Ferramenta computacional para análise do potencial de bombeamento de água utilizando aerogeradores de pequeno porte acoplados a motobombas por meio de inversores de frequência**. 2012. 106 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2012.
- OLIVEIRA, J. U. C. **Estatística: uma nova abordagem**. Rio de Janeiro: Ciência, 2010.
- OLINTO, C. R., **Um estudo sobre métodos e técnicas para aproveitamento de energia eólica com aplicação à região sul do extremo sul do Rio Grande do Sul**. Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica da Fundação Universidade Federal do Rio Grande. 2001.
- ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA. **Anais**. Santos-SP. 2011.
- PENA, H. W. A.; HOMMA, A. K. O.; SILVA, F. L. Análise de viabilidade econômica: um estudo aplicado a estrutura de custo da cultura do dendê no estado do Pará- amazônia-brasil, 2011. **Observatorio Iberoamericano del Desarrollo Local y la Economía Social**, v.5, n.11, 2011.
- PETERSEN, P. Avaliando a sustentabilidade: estudos de casos sobre impactos de inovações agroecológicas na agricultura familiar de diferentes países latino americanos. **Revista de agroecologia**, pp. 64-67, 2003.
- PINHEIRO, J. A. **Efeitos de lâminas de irrigação e de insetigação por gotejamento na cultura do feijão Vigna de cor preta**. 2008. 53 f.
- PINHEIRO, J. C. V.; AMARAL, C. R.; CARVALHO, R. M. Análise da viabilidade sócio-ambiental da fruticultura irrigada no Baixo Jaguaribe, Ceará. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, São Paulo, v. 4, n. 1, p. 3-17, 2010.
- PINHO J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACEDO, W. N. **Sistemas Híbridos: soluções energéticas para Amazônia**, MME, Brasília, 2008.

PINO, F. A. **Perfil da agricultura irrigada no final do século XX, no estado de São Paulo**. Secretaria de Fiscalização e Avaliação de Programas de Governo, 2003.

PIRES, A.; HOTZ, A. “**Setor elétrico - Agenda 2012**”. O Estado de São Paulo. São Paulo, 2011.

POLAK, P. N. A low cost drip irrigation system for small farmers in developing countries. **Journal of American Water Resources Association**. 24 – 119p. 1997.

POLLICINO, F. **Certification of small Wind turbines (SWT)**. Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Business Segment Renewables. Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. 2009.

PORRUA, F.; BEZERRA, B.; BARROSO, L. A.; LINO, P.; RALSTON, F.; PEREIRA, M. **Wind power insertion through energy auctions: power and energy society general meeting**, 2010 IEEE. Minneapolis, MN: [s.n.]. (Julho). P. 8. 2010.

PORTO, L.; CARVALHO, C. H.; FRANÇA, G.; OERTEL, L. C. Política de energias alternativas renováveis no Brasil. In IX Congresso Brasileiro de Energia e IV Seminário Latino-Americano de Energia. **Anais**. Volume II, Rio de Janeiro, p. 906-911. 2002.

PRESENÇO, J. F. **Desenvolvimento de um sistema de controle para avaliação de fontes de energias renováveis no bombeamento de água**. Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, SP, 2007. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do>>. Acesso em: 09 Abr. 2013.

RAMOS, F. G.; SEIDLER, N. Estudo da energia eólica para aproveitamento em pequenos empreendimentos. Vivências: **Revista Eletrônica de Extensão da URI**, v.7, n.13, p.108-127,

RETScreen® International Clean Energy Project Analysis Software. **RETScreen® International Clean Energy Decision Support Centre**. Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases Textbook. Disponível em: <<http://www.etscreen.net>>. Acesso em: 10 Ago. 2014.

RIBEIRO, T. A. P.; AIROLDI, R. P. S.; PATERNIANI, J. E. S.; SILVA, M. J. M. Variação temporal da qualidade da água no desempenho de filtros utilizados na irrigação por gotejamento. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** v.9, n.4. 2005.

RÍO, P. del; BURGUILLO, M. Assessing the impact of renewable energy deployment on local sustainability: towards a theoretical framework. **Renewable and Sustainable Energy Eviews**, v.12, n.5, p.1325-44, jun. 2008.

ROBERSON, J. A., CROWE, C. T. **Engineering fluid mechanics**. 15. ed; Houghton Mifflin.1993.

ROCHA, P. A. C.; SOUSA, R. C.; ANDRADE, C. F.; SILVA, M. E. V. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. **Applied Energy**, v. 89, p. 395-400, 2012.

RODRIGUEZ, M. R.; FERNANDEZ, M. D.; MASEDA, F.; VELO, R.; GONZALEZ, M. A. Electrical wire heating in sand substrates: Influence of depth and spacing on power per unit length. **Biosystems Engineering**. 89: 187-195. 2004.

SANTOS, F. J. S.; MIRANDA, F. R.; OLIVEIRA, V. H.; SAUNDERS, L. C. U. **Irrigação localizada: microirrigação**. Fortaleza: EMBRAPA-CNPAT. Documentos, 23). 1996. 48p.

SANTOS, J. **Gestão Ambiental**. Lisboa: LIDEL. 2005.

SANTANA, M. N. **Estudo e avaliação da operação de um sistema de geração eólica**. 2009. 83 p. Monografia. Universidade Federal da Bahia Escola Politécnica Curso de Graduação em Engenharia Elétrica. Salvador, 2009.

SEINFRA. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará**. SEINFRA/CE. 2001. Disponível em: <<http://www.seinfra.ce.gov.br/publicacoes.php>> . Acesso em: 10 Mar. 2013.

SILVA, G. R. **Características de vento da região nordeste análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

SILVEIRA S. R. **Geração descentralizada de energia através de fonte alternativa**. Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011.

SOBRAL, F. S. B. **Avaliação do potencial eólico para geração de energia na zona rural do Estado de Sergipe**. 2009. 168 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.

SOUSA NETO F. C. ELETROBRÁS-PROCEL, “**Programa de eficientização indústria módulo bombas**”, Rio de Janeiro, 2003.

SUN & WIND ENERGY 2010. **Small turbines with big potential**. p.108, 2010. Disponível em: <http://www.fortiswindenergy.com/upload/images/swe_0110_108-115_windenergy_smallwindturbines.pdf>. Acesso em: 10 Mar. 2013.

TAYLOR, E. S.. **Dimensional analysis for engineers**. 1oEd. Oxford: Oxford University Press, 1974.

TOLMASQUIM, M. T. **Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil**. Rio de Janeiro: Relume dumará, 2004.

VAN MEEL, J.; SMULDERS, P.; “**Wind pumping: a Handbook**”. World Bank technical paper, Washington D.C., USA, 1989.

VOGT, H. H. **Análise estrutural de pás de gerador eólico de pequeno porte feitas de fibra vegetal brasileira**. 2010, 128 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.

WANDERLEY, M. N. B. **Raízes históricas do campesinato Brasileiro**. In: TEDESCO, J. C. (org.). Agricultura Familiar Realidades e Perspectivas. 2. ed. Passo Fundo: EDIUPF, 1996. Cap. 1, p. 21-55.

WENZEL, Guilherme München. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal**. 2007, 74 p. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

WWEA - WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. **Wind energy international 2007-2008**. ISBN 81-7525-641-9 ed. WWEA, New Delhi, India. 2009.

WWEA - WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. **World energy report 2011**. Bonn, Germany. Disponível em:
<<http://www.wwindea.org/webimages/WorldWindEnergyReport2011.pdf>>. Acesso em: 19 Ago. 2013.