



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Campus de Guaratinguetá

FERNANDO LAMAS GRANERO

**VIABILIDADE DE TURBINAS EÓLICAS
DE PEQUENO PORTE NO BRASIL**

Guaratinguetá

2012

FERNANDO GRANERO

VIABILIDADE DE TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE NO BRASIL

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

Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli

Guaratinguetá

2012

Granero, Fernando Lamas

G756v Viabilidade de turbinas eólicas de pequeno porte no Brasil /
Fernando Lamas Granero. – Guaratinguetá : [s.n], 2012

54 f.

Bibliografia : f. 52

Trabalho de Graduação em Engenharia Eletrica –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá, 2012

Orientador: Prof Dr Durval Luiz Silva Ricciulli

1. Energia eólica I.Título

CDU 620.91



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Campus de Guaratinguetá

VIABILIDADE DE TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE NO BRASIL

FERNANDO LAMAS GRANERO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “**GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**”

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

Prof. Dr. Leonardo Mesquita

Coordenador de Curso

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli

Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. Fernando Ribeiro Filadelfo

UNESP-FEG

Eng. Marcelo Henrique Gomides Moreira

Empresa Alstom

Dezembro de 2012

DADOS CURRICULARES

FERNANDO LAMAS GRANERO

NASCIMENTO	13.12.1985 – SÃO PAULO/ SP
FILIAÇÃO	Alexandre Granero Maria das Graças Lamas Granero
2001/2003	ETE. Getúlio Vargas – São Paulo/SP
2007/2012	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp – Guaratinguetá.
2010/2011	Curso de Graduação em Energias Renováveis <i>Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft – Karlsruhe</i> - Alemanha.

Dedico este trabalho a minha família, amigos e
namorada que me apoiaram em todos os
momentos de minha jornada.

Fernando Lamas Granero

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer aos meus pais que sempre me deram o apoio necessário, financeiro e moral, durante todas as fases da minha vida.

A todos os professores que contribuíram para minha formação profissional, sendo que gostaria de destacar o meu orientador Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli.

Aos colegas que conheci na Alemanha, que me ajudaram muito em momentos difíceis, me mostraram um mundo de possibilidades e a diversidade cultural que nele existe.

A República Palace II e aos amigos da universidade, que foram minha segunda família, estando sempre todos unidos nos momentos bons e nos momentos de dificuldades.

A minha namorada, que me apoia e serve como meu porto seguro a todos os momentos. E finalmente a Deus.

*“Sorte é aquilo que acontece quando a
preparação encontra a oportunidade.”*

Elmer Letterman

GRANERO, F. L. **Viabilidade de Turbinas Eólicas de Pequeno Porte no Brasil**. 2012. 54 f. Trabalho de Graduação. (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Diante de um cenário global onde o petróleo é escasso e a emissão de CO₂ na atmosfera terrestre é uma preocupação mundial, a busca por novos métodos de produção de energia torna-se o foco de todos os países. Com base nessas premissas, a energia eólica ganha grande destaque e passa a ser o método mais explorado ao redor do mundo, uma vez que esta não produz resíduos tóxicos, já que se utiliza o vento, matéria prima sem escassez, e seu custo e eficiência mostram-se a cada dia mais atrativo. Aproveitando-se das características geográficas do Brasil, extensão territorial e litorânea, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade do uso de turbinas eólicas muito utilizadas na Alemanha, um dos países com maior produção de energia através dos ventos, no Brasil. Visando aumentar a produção energética sem causar mais impactos ambientais, serão feitas análises geográficas, elétricas e financeiras para averiguar as características e custos da produção deste tipo de geração de energia, e ao final desta trabalho, concluir-se-á para uma das turbinas, *Montana*, há viabilidade na instalação, contudo devido ao pouco incentivo governamental o retorno não é muito expressivo. Com relação à turbina *Passaat*, esta é inviável de se instalar nas condições atuais.

PALAVRAS-CHAVE: Energia, turbina eólica, viabilidade, custos e impactos ambientais.

GRANERO, F. L. **Feasibility of Small Wind Turbines in Brazil**. 2012. 54 f. Undergraduate Work. (Electrical Engineering) – College of engineering Campus of Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

Facing a global scenario where oil is scarce and the emission of CO₂ in the atmosphere is a world concern, the search for new methods of energy production becomes the focus of all countries. Based on these assumptions, the wind power gains highlight and happen to be the most exploited around the world, since this does not produce toxic waste, since it uses the wind, no raw material shortage and its cost and efficiency are increasingly attractive. Taking advantage of the geographical features of Brazil, coastal and territorial extension, this study aims to analyze the feasibility of using wind turbines widely used in Germany, one of the countries with the highest production of energy through wind, in Brazil. In order to increase the energy production without causing more environmental impacts, geographical analyses will be made, and to determine the features and costs of production of this type of energy generation, and at the end of this dissertation, will finish for one of the turbines, Montana, is it feasible to install, however due to the Government's little incentive return is not very expressive. With respect to the turbine Passaat, this is infeasible to install under current conditions.

KEYWORDS: Energy, wind turbine, feasibility, costs and environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Moinho de vento.....	15
Figura 2 – À esquerda uma turbina com eixo vertical, e à direita horizontal	17
Figura 3 – Captura e transformação da energia.	20
Figura 4 – Fluxo de ar através de uma área transversal A	21
Figura 5 – Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.....	22
Figura 6 – Distribuição de c_p em função de v^3/v_1	23
Figura 7 – Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador.....	24
Figura 8 – Característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações numéricas	25
Figura 9 – Primeira turbina eólica instalada no Brasil, em Fernando de Noronha	26
Figura 10 – Turbina eólica <i>Fortis Montana</i>	29
Figura 11 – Estrutura e detalhes da turbina eólica	30
Figura 12 – Turbina eólica <i>Fortis Passaat</i>	31
Figura 13 – Dispositivo Aecon SIEB & MEYER	33
Figura 14 – Controle e Gestão de desempenho desde o gerador eólico até a rede pública	33
Figura 35 – Atlas do Potencial Eólico do Brasil.....	40
Figura 46 – Gráfico da potência fornecida pela <i>Montana</i> em função da velocidade do vento.....	41
Figura 17 – Gráfico da produção anual de energia do gerador eólico em função da velocidade do vento (turbina <i>Montana</i>).....	42
Figura 18 – Gráfico da potência fornecida pela <i>Passaat</i> em função da velocidade do vento ..	42
Figura 19 – Gráfico da produção anual de energia do gerador eólico em função da velocidade do vento (turbina <i>Passaat</i>).....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade eólica instalada no Brasil em 2011.....	27
Tabela 2 – Dados técnicos da <i>Montana</i>	31
Tabela 3 – Dados técnicos da <i>Passaat</i>	34
Tabela 4 – Entrada (3 fases).....	34
Tabela 5 – Circuito de freio.....	34
Tabela 6 – Saída.....	34
Tabela 7 – Geral.....	35
Tabela 8 – Proporções do custo de implantação de uma central eólica.....	44
Tabela 9 – Receita anual gerada por cada tipo de aerogerador.....	47
Tabela 10 – Saldo devedor para a turbina <i>Montana</i> para o modelo <i>net-metering</i>	47
Tabela 11 – Saldo devedor para a turbina <i>Passaat</i> para o modelo <i>net-metering</i>	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Proinfa	– Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PCHs	– Pequenas Centrais Hidrelétricas
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	– Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
GWEC	– <i>Global Wind Energy Council</i>
AWEA	– American Wind Energy Association
USDOE	– United States Department of Energy
TIR	– Taxa Interna de Retorno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo.....	13
2	ENERGIA EÓLICA	14
2.1	História da energia eólica	14
2.2	Tipos de turbina eólica.....	17
2.3	Vantagens e Desvantagens da Energia Eólica	18
2.3.1	Vantagens	18
2.3.2	Desvantagens	19
3	TRANSFORMAÇÃO DA ENERGIA.....	20
4	ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....	26
5	TURBINA PROPOSTA.....	29
5.1	<i>Fortis Montana.....</i>	<i>29</i>
5.2	<i>Fortis Passaat</i>	<i>31</i>
6	SISTEMAS DE MEDIÇÕES	36
6.1	Sistema brasileiro	36
6.2	Sistema bidirecional	36
6.2	Sistema <i>Net-metering</i>	37
7	ANÁLISE DE VIABILIDADE	38
7.1	Análise do vento.....	38
7.2	Análise gráfica da turbina	40
7.2.1	<i>Fortis Montana</i>	<i>40</i>
7.2.2	<i>Fortis Passaat</i>	<i>41</i>
7.3	Viabilidade econômica	43
7.4	Tempo de Retorno do Investimento	46
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia cresce cada vez mais com a globalização, modernização e automação de processos antes realizados manualmente. Com isso, buscam-se novos métodos de produção de energia para suportar essa demanda.

O Brasil, país exemplo na produção de energia por usinas hidroelétricas, ainda busca alternativas para produzir energia, uma vez que os recursos hídricos são limitados e geram muitos conflitos referentes às mudanças ambientais e sociais que grandes hidrelétricas proporcionam.

Um método de produção de energia muito difundido na Europa e que vem ganhando o interesse no Brasil é energia eólica, onde se aproveita a força do vento para produzir energia através de turbinas.

Com base no estágio realizado na área de energia renovável na Alemanha, país que mais utiliza a energia dos ventos, será apresentado como funciona a produção de energias pelo vento e uma turbina eólica padrão utilizada durante o período de estágio, seu funcionamento e especificações.

Será feito também um estudo sobre o desenvolvimento desse tipo de energia no Brasil e uma análise da viabilidade de se utilizar esse método no país. Ao término desta monografia pretende-se concluir se é viável ou não utilizar a energia eólica no Brasil com este padrão de turbina.

1.1 Objetivo

O presente trabalho visa analisar a viabilidade de se utilizar turbinas eólicas no Brasil com base nas turbinas empregadas no período de estágio desenvolvido na Alemanha.

2 ENERGIA EÓLICA

2.1 História da Energia Eólica

Energia eólica é a energia obtida através do vento. O termo eólico vem do latim *aeolicus*, nome associado a Éolo, Deus dos ventos da mitologia grega (SILVA, 2009). Já há quatro milênios as pessoas usavam a energia eólica para fazer mover os barcos à vela no Egito. As velas capturavam a energia no vento para empurrar um barco ao longo da água. Os primeiros moinhos de vento, usados para moer grãos, surgiram entre 2 mil a.C., na antiga Babilônia, e 200 a.C. na antiga Pérsia, dependendo de para quem se pergunta. Estes primeiros dispositivos consistiam em uma ou mais vigas de madeira montadas verticalmente, e em cuja base havia uma pedra de rebole fixada ao eixo rotativo que girava com o vento (SILVA, 2009).

O conceito de se usar a energia do vento para moer grãos se espalhou rapidamente ao longo do Oriente Médio e foi largamente utilizado antes que o primeiro moinho de vento aparecesse na Europa. No início do século XI d.C., os cruzados europeus levaram o conceito para casa e surgiu o moinho de vento do tipo holandês com o qual se está familiarizado (SILVA, 2009).

O desenvolvimento da tecnologia da energia eólica moderna e suas aplicações estavam bem encaminhados por volta de 1930, quando estimados 600 mil moinhos de vento abasteciam áreas rurais com eletricidade e serviços de bombeamento de água. Assim que a distribuição de eletricidade em larga escala se espalhou para as fazendas e cidades do interior, o uso de energia eólica nos Estados Unidos começou a decrescer, mas reviveu depois da escassez de petróleo no início dos anos 70 (SILVA, 2009). Na Figura 1 apresenta um exemplo dos primeiros moinhos.



Figura 1 – Moinho de vento (MENDE, 2011)

O início da adaptação dos cataventos para geração de energia elétrica teve início no final do século XIX. Em 1888, Charles F. Bruch, um industrial voltado para eletrificação em campo, ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro catavento destinado à geração de energia elétrica. Tratava-se de um catavento que fornecia 12 kW em corrente contínua para carregamento de baterias, as quais eram destinadas, sobretudo, para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes (SHEPHERD, 1994). Bruch utilizou-se da configuração de um moinho para o seu invento. A roda principal, com suas 144 pás, tinha 17 m de diâmetro em uma torre de 18m de altura. Todo o sistema era sustentado por um tubo metálico central de 36 cm que possibilitava o giro de todo o sistema acompanhando, assim, o vento predominante. Esse sistema esteve em operação por 20 anos, sendo desativado em 1908. Sem dúvida, o catavento de Bruch foi um marco na utilização dos cataventos para a geração de energia elétrica (RIGHTER, 1991).

O invento de Bruch apresentava três importantes inovações para o desenvolvimento do uso da energia eólica para geração de energia elétrica. Em primeiro lugar, a altura utilizada pelo invento estava dentro das categorias dos moinhos de ventos utilizados para beneficiamento de grãos e bombeamento d'água. Em segundo lugar, foi introduzido um mecanismo de grande fator de multiplicação da rotação das pás (50:1) que funcionava em

dois estágios, possibilitando um máximo aproveitamento do dínamo cujo funcionamento estava em 500 rpm. Em terceiro lugar, esse invento foi a primeira e mais ambiciosa tentativa de se combinar a aerodinâmica e a estrutura dos moinhos de vento com as recentes inovações tecnológicas na produção de energia elétrica (SHEFHERD, 1994).

Um dos primeiros passos para o desenvolvimento de turbinas eólicas de grande porte para aplicações elétricas foi dado na Rússia em 1931. O aerogerador *Balaclava* (assim chamado) era um modelo avançado de 100 kW conectado, por uma linha de transmissão de 6,3 kV de 30 km, a uma usina termelétrica de 20 MW. Essa foi a primeira tentativa bem sucedida de se conectar um aerogerador de corrente alternada com uma usina termelétrica (SEKTOROV, 1934). A energia medida foi de 280.000 kWh/ano, o que significa um fator médio de utilização de 32%. O gerador e o sistema de controle ficavam no alto da torre de 30 metros de altura, e a rotação era controlada pela variação do ângulo de passo das pás. O controle da posição era feito através de uma estrutura em treliças inclinada apoiada sobre um vagão em uma pista circular de trilhos. (CHESF-BRASCEP, 1987).

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte, uma vez que os países em geral empenhavam grandes esforços no sentido de economizar combustíveis fósseis. Os Estados Unidos desenvolveram um projeto de construção do maior aerogerador até então projetado. Tratava-se do aerogerador *Smith-Putnam* cujo modelo apresentava 53,3 m de diâmetro, uma torre de 33,5 m de altura e duas pás de aço com 16 toneladas. Na geração elétrica, foi usado um gerador síncrono de 1.250 kW com rotação constante de 28 rpm, que funcionava em corrente alternada, conectado diretamente à rede elétrica local (SHEFHERD, 1994). Esse aerogerador iniciou seu funcionamento em 10 de outubro de 1941, em uma colina de *Vermont* chamada *Grandpa's Knob*. Em março de 1945, após quatro anos de operação intermitente, uma das suas pás (que eram metálicas) quebrou-se por fadiga (EWEA, 1998).

2.2 Tipos de Turbina Eólica

Há duas classes principais de turbinas eólicas: eixo horizontal e vertical. O modelo de eixo horizontal é o formato típico do moinho de vento ou hélice, enquanto o modelo de eixo vertical é menos familiarizado. A turbina de vento de eixo horizontal (HAWT) consiste de uma turbina ou hélice tendo duas ou mais lâminas que giram um eixo horizontal. Este eixo fornece binário para produzir energia mecânica ou elétrica. Eletricidade é gerada quando o torque é convertido através de uma caixa de velocidades em uma maior velocidade de rotação que impulsiona um gerador (DUBREUIL, 2012). Turbinas eólicas de eixo vertical têm um eixo de movimentação vertical e são muito menos comuns do que HAWTs. A Figura 2 mostra o modelo dos dois tipos de turbinas.

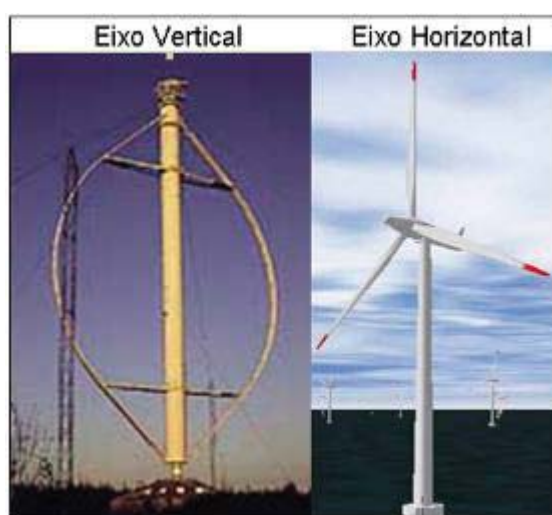


Figura 2 – À esquerda uma turbina com eixo vertical, e à direita horizontal (ROSSI, 2011)

Turbinas eólicas modernas são classificadas pelo poder que eles podem produzir a velocidade de vento do pico. A maior turbina eólica do mundo está instalada em *Emden*, na Alemanha. Foi construída em 2007, com 6 megawatts (MW) de potência, pela *Enercom*. Entretanto, em 2009 esta turbina E-126 foi repotenciada tendo sido aumentada a sua capacidade para 7,5 MW. (DUBREUIL, 2012).

2.3 Vantagens e Desvantagens da Energia Eólica

2.3.1 Vantagens

Para a Sociedade em geral:

- É uma fonte renovável, não emite gases de efeito estufa, gases poluentes e nem gera resíduos na sua operação, o que a torna uma fonte de energia de baixíssimo impacto ambiental.
- O grande potencial eólico no mundo aliado com a possibilidade de gerar energia em larga escala torna esta fonte a grande alternativa para diversificar a matriz energética do planeta e reduzir a dependência ao petróleo. Em 2011, na União Europeia, ela já representa 6,3% da matriz energética, e no mundo mais de 3,0% de toda a energia elétrica.
- Finalmente, com a tendência de redução nos custos de produção de energia eólica, e com o aumento da escala de produção, deve se tornar uma das fontes de energia mais baratas.

Para as comunidades onde se inserem os Parques Eólicos:

- Os parques eólicos são compatíveis com outros usos e utilizações do terreno como a agricultura e a criação de gado, já que os atuais aerogeradores têm dezenas de metros de altura.
- Criação de emprego;
- Geração de investimento em zonas desfavorecidas;
- Benefícios financeiros (proprietários e comunidade vizinha).

Para o estado:

- Reduz a elevada dependência energética do exterior, nomeadamente a dependência em combustíveis fósseis;
- Poupança devido à menor aquisição de direitos de emissão de CO₂ por cumprir o protocolo de Quioto e menores penalizações por não cumprir;
- Possível contribuição na cota de emissão de gases com efeito estufa para outros setores da atividade económica;
- É uma das fontes mais baratas de energia podendo competir em termos de rentabilidade com as fontes de energia tradicionais.

Para os investidores:

- Os aerogeradores não necessitam de abastecimento de combustível e requerem escassa manutenção, uma vez que só se procedem à sua revisão em cada seis meses.
- Excelente rentabilidade do investimento. Em menos de seis meses, o aerogerador recupera a energia gasta com o sua fabricação, instalação e manutenção.

2.3.2 Desvantagens

- A intermitência, ou seja, nem sempre o vento sopra quando a eletricidade é necessária, tornando difícil a integração da sua produção no programa de exploração;
- Pode ser ultrapassado com as pilhas de combustível (H₂);
- Provoca um impacto visual considerável, principalmente para os moradores em redor, a instalação dos parques eólicos gera uma grande modificação da paisagem;
- Impacto sobre as aves do local: principalmente pelo choque destas nas pás, efeitos desconhecidos sobre a modificação de seus comportamentos habituais de migração;
- Impacto sonoro: o som do vento bate nas pás produzindo um ruído constante (43 dB(A)). As habitações mais próximas deverão estar no mínimo a 200 m de distância.

3 TRANSFORMAÇÃO DA ENERGIA

Para transformar a energia eólica, que é a energia cinética da massa de ar, em energia mecânica é necessário fazer a conversão da mesma. A captura e a transformação da energia são simplificadas na Figura 3.



- 1) O vento faz as hélices girarem.
- 2) O eixo movimenta o gerador para produzir energia.
- 3) O transformador converte a energia em alta voltagem.
- 4) A eletricidade é transmitida pela rede elétrica.

Figura 3 – Captura e transformação da energia (SILVA, 2009)

A parte que ocorre no gerador pode ser entendida pelos cálculos considerados a seguir. A energia cinética de uma massa de ar m em movimento a uma velocidade v é dada pela equação (3.1):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

Considerando a mesma massa de ar m em movimento a uma velocidade v , perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário (Figura 4), pode-se demonstrar que a potência disponível no vento que passa pela seção A , transversal ao fluxo de ar, é dada pela equação (3.2):

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3.2)$$

Onde:

P = potência do vento [W]

ρ = massa específica do ar [kg/m^3]

A = área da seção transversal [m^2]

v = velocidade do vento [m/s]

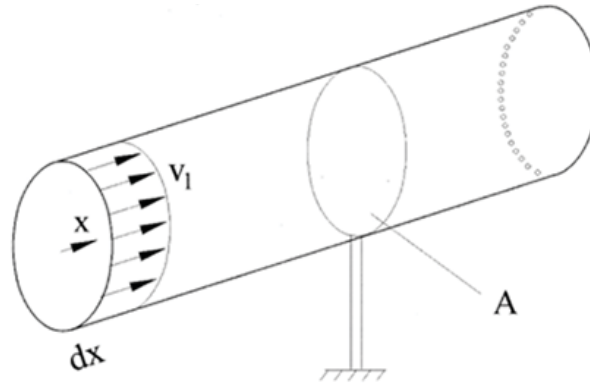


Figura 4 – Fluxo de ar através de uma área transversal A (DUTRA, 2001)

A expressão 3.2 também pode ser escrita por unidade de área, definido, desta forma, a densidade de potência **DP** , ou fluxo de potência conforme equação (3.3):

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (3.3)$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia elétrica. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência c_p , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor (DUTRA, 2008).

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento (c_p máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde v_1 representa a velocidade do vento na região anterior às pás, v_2 a velocidade do vento no nível das pás e v_3 a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na Figura 5 (DUTRA, 2008).

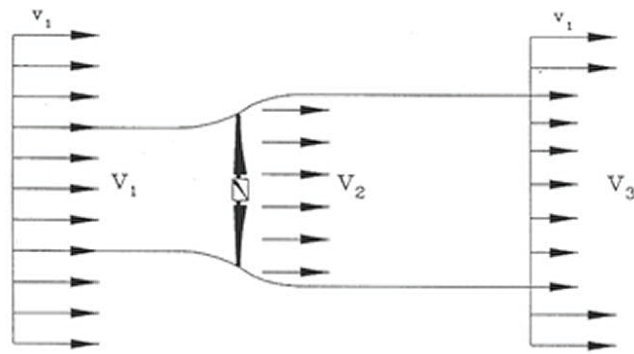


Figura 5 – Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás (DUTRA, 2001)

Como na Figura 5, Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade v_1 que é retardada pelo conjunto de pás, assumindo uma velocidade v_3 a jusante das pás. Pela lei da continuidade, temos a equação (3.4):

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3 \quad (3.4)$$

Como a redução da pressão do ar é mínima, a densidade do ar pode ser considerada constante. A energia cinética extraída pelo aerogerador é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás, conforme equação (3.5):

$$E_{ex} = \frac{1}{2} m(v_1^2 - v_3^2) \quad (3.5)$$

A potência extraída do vento por sua vez é dada pela expressão (3.6):

$$\dot{E}_{ex} = \dot{m}(v_1^2 - v_3^2) \quad (3.6)$$

Neste ponto é necessário fazer duas considerações extremas sobre a relação entre as velocidades v_1 e v_3 :

- A velocidade do vento não é alterada ($v_1 = v_3$) – Neste caso nenhuma potência é extraída;
- A velocidade do vento é reduzida a valor zero ($v_3 = 0$) – Neste caso o fluxo de massa de ar é zero, o que significa também que nenhuma potência seja retirada.

A partir dessas duas considerações extremas, a velocidade referente ao máximo da potência extraída é um valor entre v_1 e v_3 . Este valor pode ser calculado se a velocidade no rotor v_2 é conhecida. A massa de ar é dada pela equação (3.7):

$$\dot{m} = \rho A v_2 \quad (3.7)$$

Pelo teorema de *Rankine-Froude*, pode-se assumir que a relação entre as velocidades v_1 , v_2 e v_3 é dada pela expressão (3.8):

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (3.8)$$

Se a massa de ar apresentada na equação 3.7 e a velocidade v_2 apresentada na equação 3.8 forem inseridas na mesma equação 3.6, tem-se a equação (3.9):

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.9)$$

Onde:

$$Potência\ do\ vento = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

$$Coeficiente\ de\ Potência\ c_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$$

Com base na expressão encontrada, a Figura 6 apresenta a distribuição do coeficiente c_p em função das velocidades do vento.

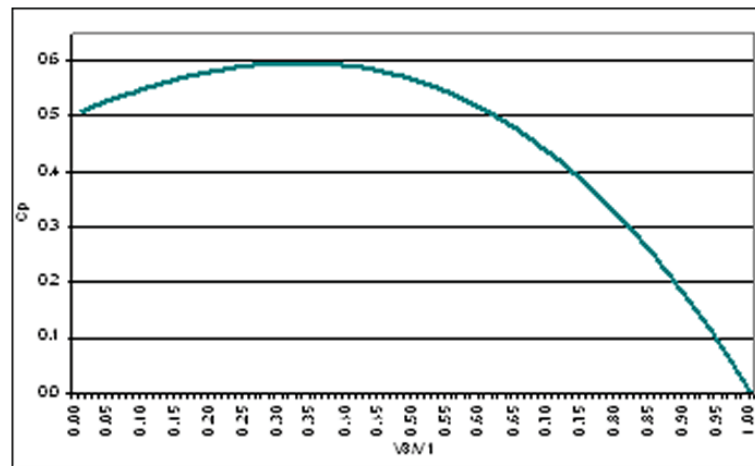


Figura 6 – Distribuição de c_p em função de v_3/v_1 (DUTRA, 2001)

Ao considerar o coeficiente de potência c_p em função de v_3/v_1 temos que:

$$c_{p\ Betz} = \frac{16}{27} = 0,59$$

Onde $v_3/v_1 = 1/3$.

A Figura 7 mostra as principais forças atuantes em uma pá do aerogerador, assim como os ângulos de ataque (α) e de passo (β). A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante visto pela pá (V_{res}), resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente (V_w) com a velocidade tangencial da pá do aerogerador (V_{tan}), conforme a equação (3.10).

$$\vec{V}_{res} = \vec{V}_w - \vec{V}_{tan} \quad (3.10)$$

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

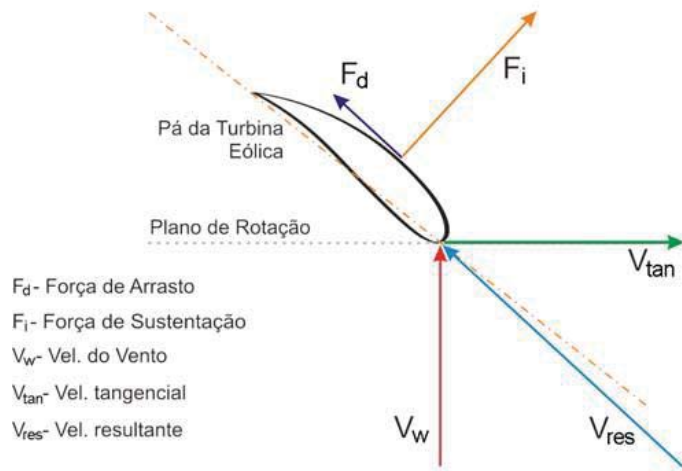


Figura 7 – Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador (MONTEZANO, 2007)

A potência mecânica extraída do vento pelo aerogerador depende de vários fatores. Mas tratando-se de estudos elétricos, o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pelas equações (3.11) e (3.12) (PAVINATTO, 2005).

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 c_p(\lambda, \beta) \quad (3.11)$$

Com:

$$\lambda = \left(\frac{R \omega_{wt}}{v_w} \right) \quad (3.12)$$

Onde:

c_p – coeficiente de potência do aerogerador

λ – razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip seep ratio*)

ω_{wt} – velocidade angular do rotor [rad/s]

R – raio do rotor [m]

ρ – densidade do ar [Kg/m³]

A – área varrida pelo rotor [m²]

v_w – velocidade do vento incidente no rotor [m/s]

Na equação (3.11), o coeficiente de potência $c_p(\lambda, \beta)$ depende das características do aerogerador, sendo função da razão de velocidades λ e do ângulo de passo β das pás (*pitch*) do aerogerador. O $c_p(\lambda, \beta)$ é expresso como uma característica bidimensional (DUTRA, 2008).

Aproximações numéricas normalmente são desenvolvidas para o cálculo de c_p para valores dados de λ e β (RAIAMBAL, 2002). A Figura 8 mostra a característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçada para vários valores de β .

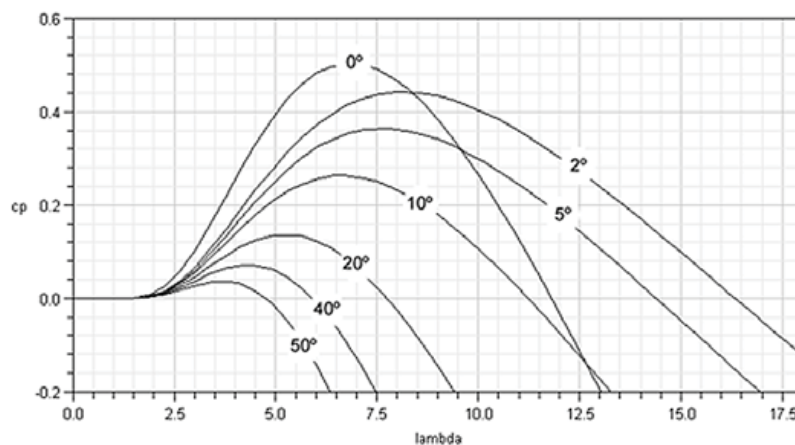


Figura 8 – Característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações numéricas (MONTEZANO, 2007)

4 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

A primeira turbina de energia eólica do Brasil foi instalada em Fernando de Noronha em 1992 (Figura 9). Dez anos depois, o governo criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) para incentivar a utilização de outras fontes renováveis, como eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Estas estações podem usar energia hidrelétrica, o carro-chefe da matriz energética do Brasil, que compreende cerca de três quartos da capacidade energética instalada do Brasil (DUTRA, 2008).



Figura 9 – Primeira turbina eólica do Brasil, em Fernando de Noronha (DUTRA, 2008)

O alto custo da produção de energia, juntamente com as vantagens da energia eólica como uma fonte de energia renovável, amplamente disponível, tem levado vários países a estabelecer incentivos regulamentando e dirigindo investimentos financeiros para estimular a geração de energia eólica.

Desde a criação do Proinfa, a produção de energia eólica no Brasil aumentou de 22 MW em 2003 para 602 MW em 2009, quase 1000 MW em 2011, como parte dos 36 projetos privados. Outros 10 projetos estão em construção, com uma capacidade de 256,4 MW, e 45 outros projetos foram aprovados pela ANEEL, com um potencial estimado de 2.139,7 MW.

Considerando o potencial eólico instalado e os projetos em construção para entrega até 2013, o país atingirá no final de 2013 a marca dos 4.400 MW.

O desenvolvimento destas fontes de energia eólica no Brasil está ajudando o país a alcançar seus objetivos estratégicos de aumentar a segurança energética, reduzir as emissões de gases de efeito estufa e criando empregos. O potencial para este tipo de geração de energia no Brasil poderia chegar a até 145.000 MW, segundo o Relatório de Potencial de Energia Eólica de 2001 do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL, 2001).

A energia eólica no Brasil em agosto de 2011 apresentava uma capacidade instalada de 1.000 MW, suficiente para abastecer uma cidade com cerca de 400 mil residências. Os 36 parques eólicos e fazendas eólicas do país, em 2009, estavam localizados em cinco estados do Nordeste, três do Sul e um do Sudeste. A Tabela 1 a seguir apresenta a capacidade instalada nas 6 maiores instalações eólicas do Brasil em 2011.

Tabela 1 – Capacidade eólica instalada no Brasil em 2011

Nome	Capacidade instalada (MW)	Estado
Parque eólico de Osório	150	Rio Grande do Sul
Usina de Energia Eólica de Praia Formosa	104	Ceará
Parque eólico Alegria	51	Rio Grande do Norte
Parque eólico de Rio do Fogo	49	Rio Grande do Norte
Parque Eólico Eco Energy	25	Ceará
Parque Eólico de Paracuru	23	Ceará

Em 14 de dezembro de 2009, cerca de 1.800 megawatts (MW) foram contratados com 71 usinas de energia eólica programados para serem entregues a partir do 1 de julho de 2012. Ao focalizar internamente na geração de energia eólica, o Brasil é parte de um movimento internacional para tornar a energia eólica uma fonte primária de energia.

Na verdade, a energia eólica tem tido a maior taxa de expansão de todas as fontes renováveis de energia disponíveis, com um crescimento médio de 27% por ano desde 1990, segundo o *Global Wind Energy Council* (GWEC). Até 2014 deve ser atingida uma capacidade instalada de 7.000 megawatts (MW).

O custo de produção de energia continua a representar um desafio significativo para o crescimento da energia eólica. O preço por megawatt-hora (MWh) estabelecido no Brasil para o fornecimento de energia de reserva era de R\$ 189, enquanto o teto definido na licitação para as usinas do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira foi de R\$ 91 (UHE Jirau), em 2008, e R\$ 122 (UHE Santo Antônio) em 2007. Estes preços de hidroeletricidade foram marcados por até 35% em leilões de 2008 e 2007; o fornecimento de energia foi negociado a R\$ 71,4/MWh no caso de Jirau, e R\$ 78,9/MWh para a usina de Santo Antônio (MARCONDES, 2010).

Já no leilão da ANEEL, realizado em 27 de agosto de 2010, o preço da energia de origem eólica ficou em R\$ 130,8/MWh, tendo sido inferior ao da de biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) (MARCONDES, 2010).

No leilão de agosto de 2011, o preço da energia eólica atingiu um novo patamar, ainda mais baixo, R\$99,58/MWh, ficando até mais barato que a energia de termelétricas a gás natural. Neste leilão foi vendido mais de 1.900 MW, valor maior que o total de energia eólica instalado no país até o momento, assim, a produção de energia eólica no país vai mais que dobrar até 2014, ano de conclusão dos projetos vendidos no leilão.

5 TURBINA PROPOSTA

A *Fortis Wind Energy* produz turbinas eólicas de pequeno porte utilizadas em propriedades particulares que querem economizar em sua conta de energia elétrica ou que querem se tornar independentes da rede elétrica.

Esta empresa Holandesa desenvolve turbinas desde 1981 e com mais de 6000 de seus produtos instalados ao redor do mundo. Utilizando-se de materiais de alta tecnologia, projeto simples e um sistema de seguranças contra ventos fortes, seus produtos apresentam um elevado rendimento, padrão Europeu de qualidade e um valor abaixo quando comparado aos concorrentes (FORTIS, 2012).

A empresa *Fortis* reduziu os preços das turbinas eólicas de pequeno porte drasticamente visando tornar seus produtos viáveis em países em desenvolvimento para competir com geradores a diesel e outras fontes de energia renováveis.

5.1 *Fortis Montana*

A *Montana* é uma turbina usada frequentemente para eletrificação de casas, mas nas áreas rurais pode ser usada também para purificação ou bombeamento de água e fornecimento de energia para telecomunicação. A Figura 10 mostra a *Fortis Montana*.



Figura 10 – Turbina eólica *Fortis Montana* (FORTIS, 2012)

Este produto é composto por hélices feitas de fibra de vidro reforçada com epóxi e um gerador síncrono de 3 fases com um ímã permanente. Ele vem em voltagens diferentes, assim você pode se conectar 48 Vdc, 120 Vdc, 240 Vdc e rede monofásica ou trifásica. Outro diferencial deste equipamento é o sistema de segurança por palheta articulada, que gradualmente gira o rotor do vento, e um sistema de curto-circuito para o gerador (FORTIS, 2012). A Figura 11 mostra a estrutura e detalhes da turbina eólica.

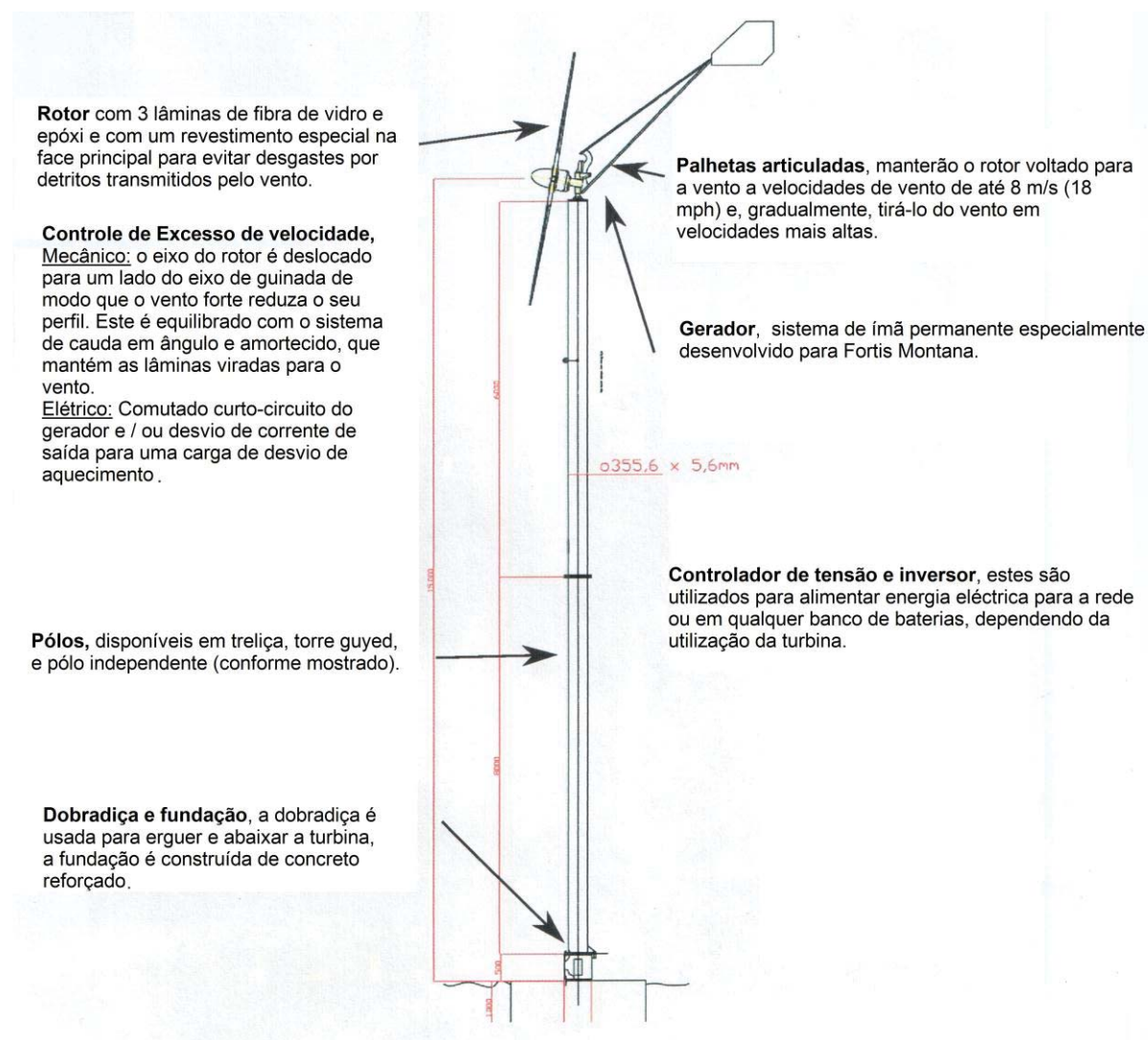


Figura 11 – Estrutura e detalhes da turbina eólica

Principais características:

- 5 anos de garantia
- Tempo médio de vida para a turbina eólica é mais de 20 anos
- Livre de manutenção

Características Técnicas:

A Tabela 2 apresenta os dados técnicos da turbina *Fortis Montana* fornecidos pela empresa fabricante.

Tabela 2: Dados técnicos da *Montana* (FORTIS, 2012)

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Potência Máxima	5.8	kW
Raio	5.0	m
Superfície	19.65	m ²
Corte com o vento	2.5	m/s
Vento de sobrevivência	55	m/s
Peso	200	kg
Frequência	120 – 450	rpm
Carregamento de Bateria	48, 120, 240	V
Conexão à rede	230, 380	V

5.2 Fortis Passaat

Outra opção de turbina disponível, porém recomendada para economia de energia em residências particulares, bombeamento de água em locais remotos e para capacitar sistemas de comunicação é a *Fortis Passaat*.

Composta por um gerador é um síncrono e 3 fases um ímã permanente, ele vem em voltagens diferentes, assim você pode se conectar 24Vdc, 48Vdc, ou aplicações de rede monofásica. A Figura 12 apresenta a turbina *Passaat*.



Figura 12 - Turbina eólica *Fortis Passaat* (FORTIS, 2012)

Características Técnicas:

A Tabela 3 apresenta os dados técnicos da turbina *Fortis Passaat* fornecidos pela empresa fabricante.

Tabela 3: Dados técnicos da *Passaat* (FORTIS, 2012)

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Potência Máxima de saída	1.4	kW
Diâmetro do rotor	3.12	m
Superfície	7.65	m ²
Corte com o vento	3.0	m/s
Vento de sobrevivência	55	m/s
Peso	75	kg
Frequência	180 – 775	rpm
Carregamento de Bateria	12, 24, 48	V
Conexão à rede	230	V

Devido à capacidade do vento de geração de energia ser muito dinâmica e desigual ocasionado por diferentes velocidades de vento, rajadas de vento e turbulência do ar, para controlar e monitorar a produção de energia e obter maior aproveitamento da turbina é necessário à instalação de um dispositivo chamado *Aeocon SIEB & MEYER*, conforme Figura 13.



Figura 13 – Dispositivo *Aeocon SIEB & MEYER* (SIEB, 2012)

Este equipamento têm todos os componentes necessários para a operação - retificador, inversor, incluindo isolamento e lastro. Eles são combinados em um corpo compacto estrutural e funcional, simplificando o processo de aquisição e economizando em instalação e comissionamento de tempo e dinheiro, conforme mostra Figura 14.

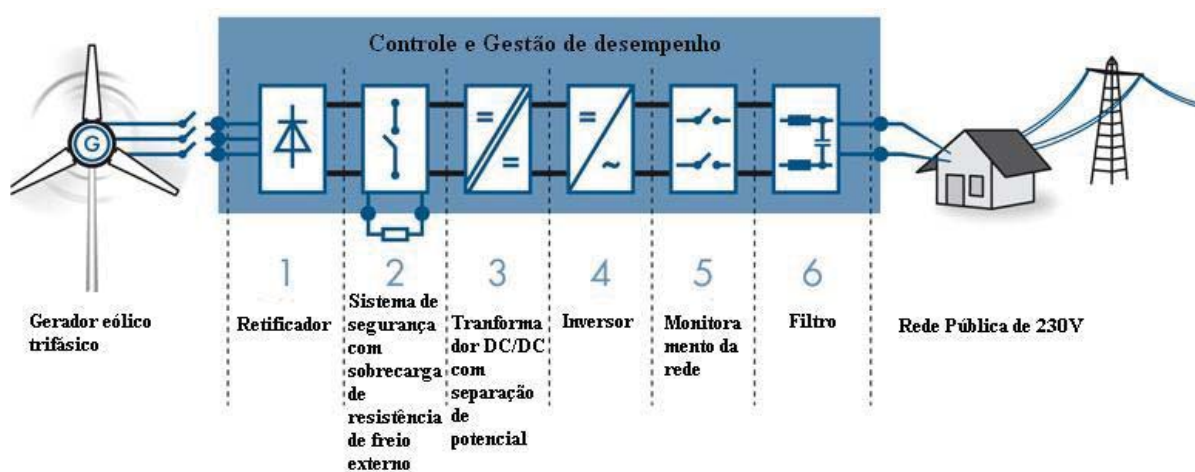


Figura 14 – Controle e Gestão de desempenho desde o gerador eólico até a rede pública

Adaptado ao sistema de controle da turbina de vento, tendo como base a curva do sistema que controla os estados de funcionamento, o dispositivo baseia-se em assegurar que a turbina eólica trabalhe em seu ponto de funcionamento ótimo em diferentes condições de vento. Mesmo a velocidades de vento baixas, a energia pode ser exportada para a rede, ocasionando um efeito positivo sobre a produção de energia e aumentando assim a eficiência global da instalação.

A distinção da *Aeocon* em relação a aparelhos semelhantes é sua dinamicidade devido à suas características técnicas. Uma gama de potência de 3 a cerca de 15 kW, uma faixa de tensão entre 40 e 340 V (Ac) e uma tensão nominal de 300 V (AC), faz com que o sistema forneça energia corretamente, mesmo com diferentes voltagens fornecidas pelo gerador ocasionadas pela velocidade variável do vento (SIEB, 2012).

Características Técnicas:

A Tabela 4 apresenta os dados técnicos de entrada do *Aeocon* fornecidos pela empresa fabricante.

Tabela 4: Entrada (3 fases)

Tipo de gerador	Gerador síncrono
Intervalo de tensão de operação	40 Vac – 340 Vac
Tensão Máxima	400 Vac
Tensão do Gerador ideal	300 Vac

A Tabela 5 apresenta os dados técnicos do circuito de freio do equipamento fornecidos pela empresa fabricante.

Tabela 5: Circuito de freio

Limiar	480 Vac / 340 Vac tensão do gerador
Resistor de frenagem externo	10 - 46 Ohms, 5 kW

A Tabela 6 apresenta os dados técnicos de saída do *Aeocon* fornecidos pela empresa fabricante.

Tabela 6: Saída

Tensão	230 Vac
Potência Nominal	4 kW / 5 kW
Corrente	17A / 22 A
Frequência	50 Hz / 60 Hz

A Tabela 7 apresenta os dados técnicos gerais do equipamento fornecidos pela empresa fabricante.

Tabela 7: Geral

Peso	26,6 kg
Dimensões	572x306x13 mm
Resfriamento	Convecção natural
Temperatura ambiente permitida	20°C - 40°C

*Tensões e corrente rms

Outra vantagem do *aeocon* é a tecnologia de entrada digital e duas potenciais saídas de relé que permitem a comunicação com um controlador externo ou com componentes de segurança externos. Pode-se monitorar todo o sistema através de *software* próprio utilizando-se da interface USB integrada equipamento.

A união destes dois equipamentos é a essência da produção de energia através da força do vento.

6 SISTEMAS DE MEDIÇÕES

6.1 Sistema brasileiro

Os consumidores de energia elétrica pagam um valor que corresponde à quantidade de energia elétrica consumida, no mês anterior, estabelecida em quilowatt-hora (kWh) e multiplicada por um valor unitário, denominado tarifa, medido em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh), que corresponde ao valor de 1 quilowatt (kW) consumido em uma hora. Ainda, dentro deste preço, embutidos na tarifa, estão os encargos do setor elétrico e os tributos determinados por lei (ANEEL, 2005).

Divididas em dois grandes grupos, “grupo A” e “grupo B”, as tarifas de energia elétrica do “grupo A” são para consumidores atendidos pela rede de alta tensão, de 2,3 a 230 kV. As tarifas do “grupo B” se destinam às unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kV. Cada grupo é, ainda, dividido em subgrupos que são classificados de acordo com a demanda de potência e o consumo (ANEEL, 2005).

6.2 Sistema Bidirecional

Produtores individuais e empresas que produzem energia renovável recebem créditos para cada kW/h produzido além de suas necessidades. Quando alguém produz mais eletricidade do que necessita, seu medidor de energia gira ao contrário, enviando aquele excesso de eletricidade para a rede elétrica. Ele recebe créditos pela eletricidade que envia para a rede, que vale como um pagamento pela eletricidade que ele venha a consumir da rede quando sua turbina não puder fornecer energia suficiente para sua casa ou empresa.

Diversas companhias de energia nos Estados Unidos ignoram esse arranjo, já que elas essencialmente estão comprando a energia eólica do produtor individual a preço de varejo em vez do preço de atacado que pagariam a uma fazenda eólica (LAYTON, 2012).

6.3 Sistema *Net-metering*

Criado nos EUA, o sistema *Net-metering* é um mecanismo de apoio a projetos de energia renováveis que estabeleceu que as companhias de eletricidade deveriam comprar energia de origem renovável seguindo um modelo de preços acordados em contrato. Desta forma os consumidores poderiam conectar suas unidades de geração à rede elétrica local, empregar a energia produzida para atender a sua demanda e vender seu excedente de energia, o qual a companhia seria obrigada a comprar (STARRS, 1996).

O intuito principal deste mecanismo é aumentar os investimentos privados em energias renováveis, estimular o crescimento econômico local, ter uma maior diversificação da mistura de recursos de energia e melhorar o meio ambiente (RODRIGUEZ, 2007).

7 ANÁLISE DE VIABILIDADE

A viabilidade de se utilizar este tipo de turbina eólica envolve diversas variáveis que irão ser analisadas a seguir.

7.1 Análise do Vento

O primeiro estudo a ser feito é analisar as características do vento no Brasil. Visando identificar áreas adequadas para aproveitamento eólico-elétrico, a ELETROBRÁS elaborou o Atlas do potencial eólico brasileiro.

O Atlas foi elaborado com base no *software* “*MesoMap*”, programa que simula a dinâmica atmosférica dos regimes de vento e variáveis meteorológicas obtidas a partir de amostragens de um banco de dados. O sistema também analisa variáveis geográficas como o relevo, a rugosidade induzida por classes de vegetação e uso do solo, interações térmicas entre a superfície terrestre e a atmosfera e efeitos do vapor de água presente no ar. (AMARANTE, 2001).

Por meio da integração dos mapas digitais, utilizando-se recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia elétrica a partir de curvas de potência de turbinas eólicas existentes no mercado, o mapeamento do potencial eólico foi realizado considerando-se as seguintes premissas (AMARANTE, 2001):

- Foram integradas todas as áreas que apresentaram velocidades médias anuais iguais ou superiores a 6 m/s.
- Foram consideradas curvas médias de desempenho de turbinas eólicas instaladas em torres de 50 m de altura.
- Para essa estimativa, foi utilizada uma densidade média de ocupação de terreno de apenas 2 MW/ km². Esse valor é considerado conservativo, uma vez que representa cerca de 20% do realizável por usinas eólicas em terrenos planos.

- Foram adotados intervalos com incrementos de 0,5 m/s para as velocidades médias anuais de vento. O desempenho de turbinas eólicas foi calculado para os limites inferiores de cada intervalo.
- Foi adotado um fator de disponibilidade de 0,98, considerado típico para usinas eólicas comerciais.
- Foram descartadas da integração as áreas cobertas por água (lagos e lagoas, açudes, rios e mar).

O ATLAS apresenta as condições médias anuais de vento para todo o território brasileiro na resolução de 1 x 1 km, conforme Figura 15.

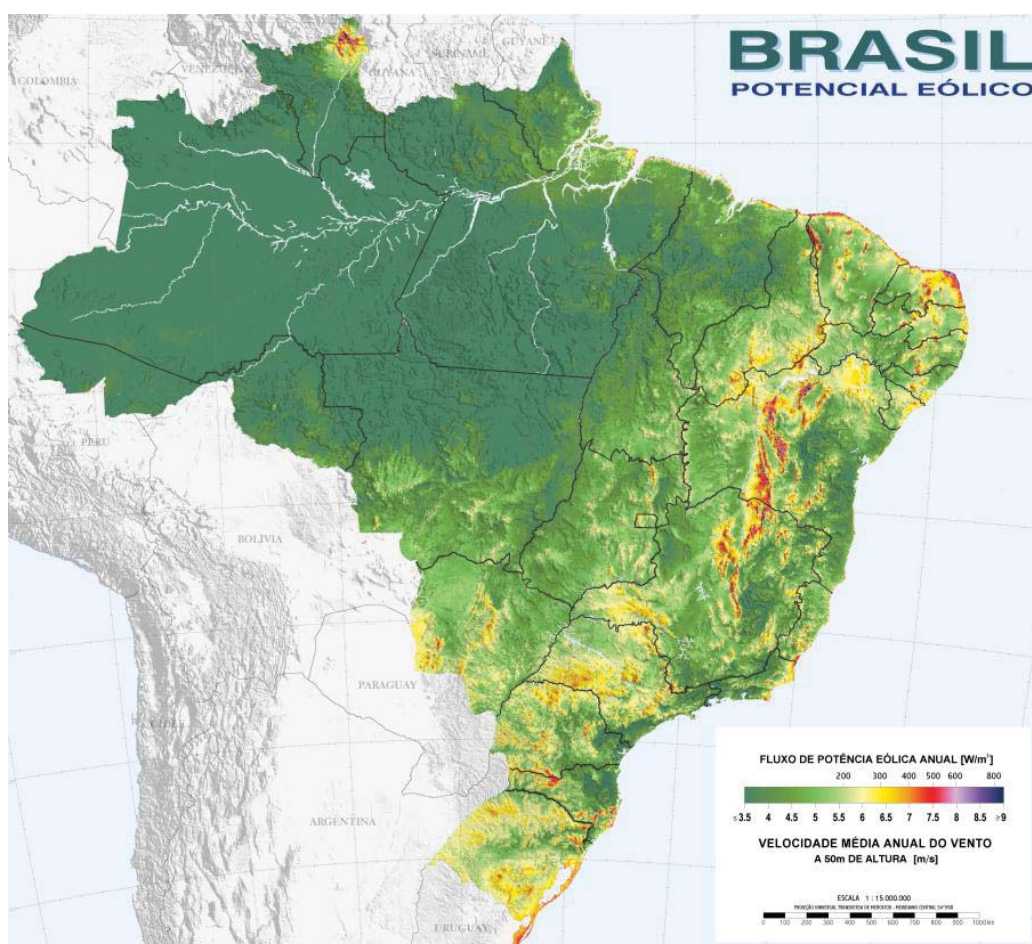


Figura 15 – Atlas do Potencial Eólico do Brasil (AMARANTE, 2001)

De acordo com os valores obtidos pela Eletrobrás e análise visual do mapa acima, pode-se concluir que a velocidade média anual do vento no território nacional varia entre 5,5 m/s e 6,5 m/s. Diante destes valores, considerou-se o valor médio de 6 m/s como base para futuras análises.

7.2 Análise gráfica das Turbinas

Na intenção de encontrar a produção de energia das turbinas levando-se em conta o valor médio do vento no Brasil, analisam-se os gráficos de produção de energia fornecidos pelo fabricante estudada neste trabalho.

7.2.1 Fortis Montana

O primeiro gráfico apresentado na Figura 16 representa a potência fornecida pela *Montana* em função da velocidade do vento.

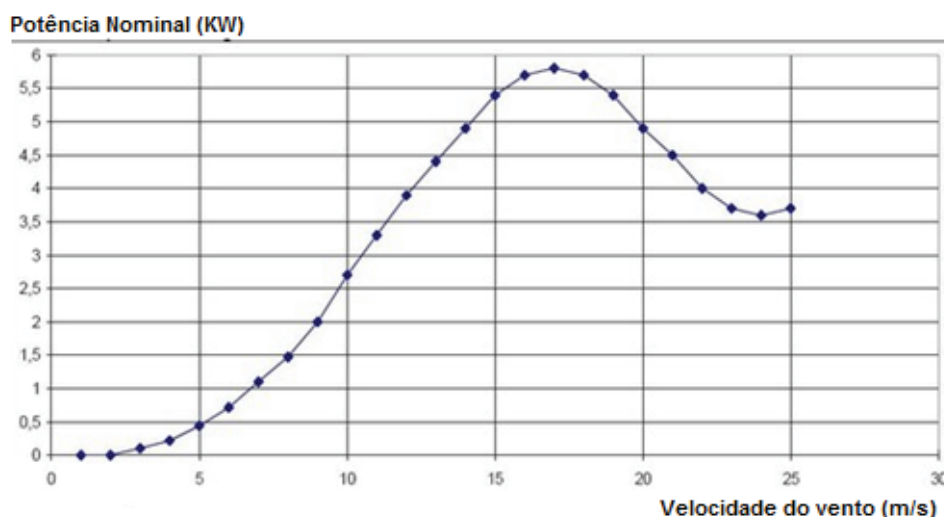


Figura 16 – Gráfico da potência fornecida pela *Montana* em função da velocidade do vento (FORTIS, 2012)

Percebe-se nitidamente que a turbina não funcionará em máxima eficiência no Brasil, visto que sua potencia máxima de 5,8 kW se dá a uma velocidade de 16 m/s. Utilizando-se da velocidade média do vento de 6 m/s, obtêm-se que o equipamento fornecerá uma potencia de 0,75 kW.

Baseando-se no gráfico da produção anual de energia do gerador eólico em função da velocidade do vento, conforme Figura 17, pode-se encontrar a produção de energia anual do equipamento.

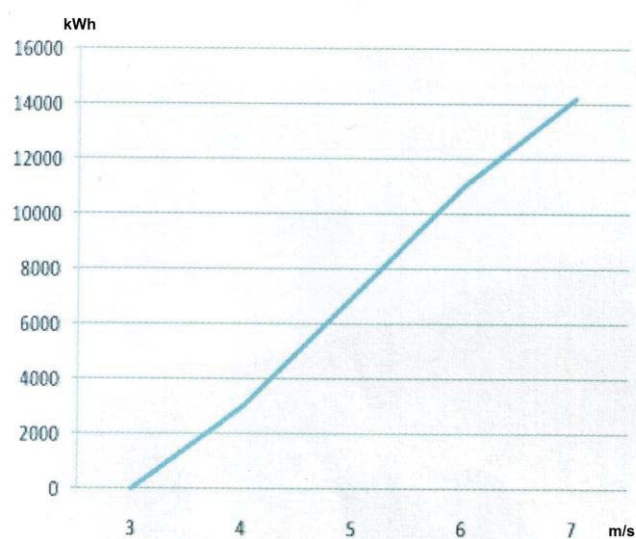


Figura 17 - Gráfico da produção anual de energia do gerador eólico em função da velocidade do vento (turbina *Montana*)

Observa-se claramente o crescimento linear da produção de energia com o aumento da velocidade do vento. Para velocidade de 6 m/s, encontra-se graficamente uma produção anual de 11000 kWh.

7.2.2 Fortis Passaat

O gráfico apresentado na Figura 18 representa a potência fornecida pela *Passaat* em função da velocidade do vento.

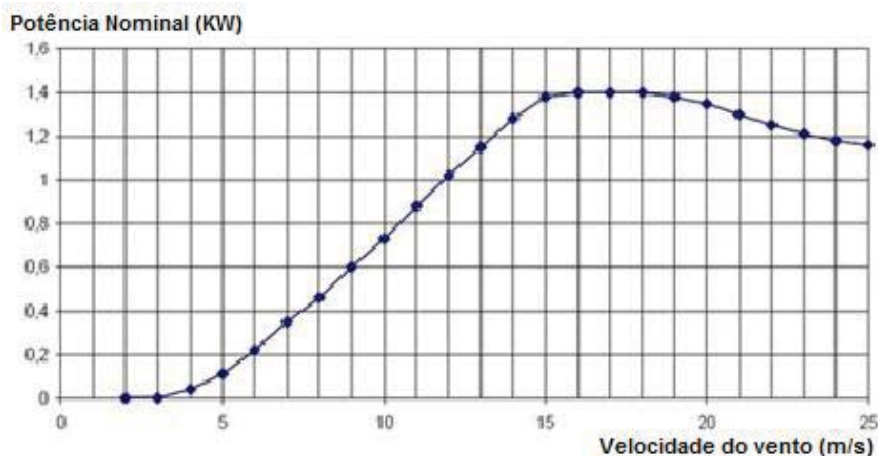


Figura 18 – Gráfico da potência fornecida pela *Passaat* em função da velocidade do vento

Do mesmo modo que a turbina anteriormente apresentada, este aerogerador não funcionará em máxima eficiência, visto que sua potencia máxima de 1,4 kW se dá a uma velocidade de 15 m/s. Utilizando-se da velocidade média do vento de 6 m/s, obtêm-se que o equipamento fornecerá uma potencia de 0,22 kW.

Baseando-se no gráfico da produção anual de energia do gerador eólico em função da velocidade do vento, conforme Figura 19, pode-se encontrar a produção de energia anual do equipamento.

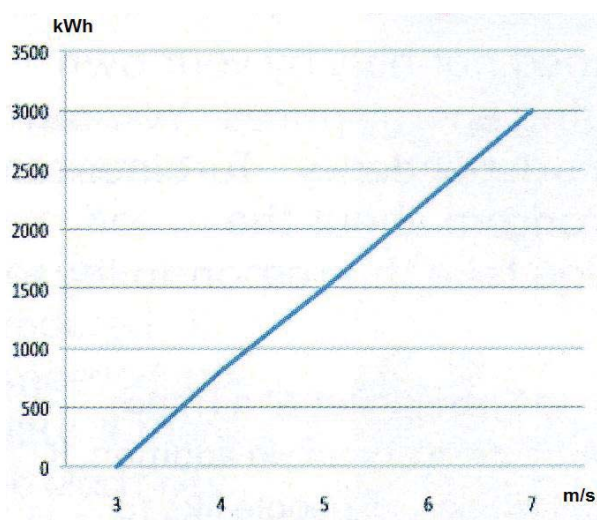


Figura 19 - Gráfico da produção anual de energia do gerador eólico em função da velocidade do vento (turbina Passaat)

O crescimento da produção de energia também é linear ao aumento da velocidade do vento. Para velocidade de 6 m/s, encontra-se graficamente uma produção anual para a *Passaat* de 2300 kWh.

O valor da produção anual encontrado comprova seu ideal de fornecimento de energia para residências, pois segundo Luciana Mendonça, o consumo médio residencial passará de 154 kWh/mês, em 2010, para 191 kWh/mês em 2020. Se dividirmos o valor da produção anual pelo número de meses no ano, encontra-se exatamente o valor previsto para o consumo em 2020 (MENDONÇA, 2011).

Com estes valores, pode-se analisar a viabilidade econômica das turbinas.

7.3 Viabilidade Econômica

Diante do objetivo de encontrar o tempo de retorno do investimento neste sistema de produção de energia, primeiramente encontra-se o valor aproximado da instalação de todos os equipamentos e outros gastos relacionados ao projeto.

Implementar um pequeno sistema de turbina eólica para a própria necessidade é uma maneira de garantir seu consumo independente de terceiros, contudo fica-se à mercê da natureza. Segundo a Associação Americana de Energia Eólica, uma configuração de turbina residencial ou empresarial pode custar entre US\$ 5 mil a US\$ 80 mil. Uma turbina de geração pública custa muito mais. A instalação de uma única turbina de 1,8 MW pode custar até US\$ 1,5 milhão, e isso não inclui o terreno, linhas de transmissão e outros custos de infraestrutura associados com o sistema de geração eólica. No total, o custo de uma fazenda eólica está ao redor de US\$ 1 mil por kW de capacidade (LAYTON, 2012).

De acordo com o Departamento de Energia Norte-americano – USDOE (2003), os custos de implantação de uma central eólica apresentam proporções (%) em relação ao investimento por unidade de potência instalada, conforme Apresenta a Tabela 8.

Tabela 8: Proporções do custo de implantação de uma central eólica

Partes de um sistema eólico	Percentual do custo unitário (%)
Terreno	0,15
Rotor	17,28
Torre	13,1
Nacele + gerador + CM	39,24
Infraestrutura	29,5
Controle e segurança	0,73

Partindo deste pressuposto e utilizando-se do valor da Turbina *Montana* fornecido pela empresa *Fortis Wind Energy*, pode-se encontrar um valor base do sistema completo e sua instalação.

Como a empresa fornece a torre e o rotor juntos, encontram-se os seguintes valores:

$$\text{percentual do custo} = \text{torre} + \text{rotor} + \text{infraestrutura}$$

$$\text{percentual de custo} = 17,28 + 13,1 + 29,5 = 59,88 \%$$

$$\text{Preço Montana} = 15.553,00 \text{ €}$$

Matematicamente tem-se:

$$\text{Preço Montana} \rightarrow 59,88 \%$$

$$\text{Valor total do sistema} \rightarrow 100 \%$$

$$\text{Valor total sistema} = 25.973,61 \text{ €}$$

Considerando a cotação do Euro de R\$ 2,63, conforme informado pela Receita Federal referente ao mês de outubro de 2012 (SILVA, 2012), calcula-se o valor do sistema em reais.

$$\text{Valor total sistema} = 25.973,61 * 2,63$$

$$\text{Valor total sistema Montana} = \text{R\$ 68.310,60}$$

Comparando com a faixa de custo fornecida pela Associação Americana de Energia Eólica, comprova-se que o valor encontrado está dentro da estimativa, considerando a cotação do Dólar de R\$ 2,03, conforme informado pela Receita Federal referente ao mês de outubro de 2012 (SILVA, 2012):

$$5.000,00\$ = \text{R\$ } 10.150,00 \text{ e } 80.000,00 \$ = \text{R\$ } 162.400,00$$

$$\text{R\$ } 10.150,00 \leq \text{R\$ } 68.310,60 \leq \text{R\$ } 162.400,00$$

Partindo das mesmas condições anteriores, pode-se calcular também o valor total do sistema para a turbina *Passaat*.

$$\text{Preço Passaat} = 7.764,00 \text{ €}$$

Matematicamente tem-se:

$$\text{Preço Passaat} \rightarrow 59,88 \%$$

$$\text{Valor total do sistema} \rightarrow 100 \%$$

$$\text{Valor total sistema} = 12.965,93 \text{ €}$$

Utilizando-se novamente da Cotação do Euro tem-se:

$$\text{Valor total sistema} = 12.965,93 * 2,63$$

$$\text{Valor total sistema Passaat} = \text{R\$ } 34.100,40$$

Comparando novamente com a faixa de custo fornecida pela Associação Americana de Energia Eólica, comprova-se que o valor encontrado também está dentro da estimativa.

$$5.000,00\$ = \text{R\$ } 10.150,00 \text{ e } 80.000,00 \$ = \text{R\$ } 162.400,00$$

$$\text{R\$ } 10.150,00 \leq \text{R\$ } 34.100,40 \leq \text{R\$ } 162.400,00$$

7.4 Tempo de Retorno do Investimento

O grande empecilho de se utilizar energia eólica no Brasil pode ser atribuído aos maiores custos logístico de implementação dos projetos e ao número restrito de ofertantes nacionais de aerogeradores associado às restrições de importação destes equipamentos.

Segundo a *American Wind Energy Association* há 20 fabricantes de turbinas eólicas de pequeno porte para uso doméstico e de pequenas empresas, contudo estas ainda não descobriram o potencial do mercado Brasileiro (World, 2009).

Diante deste cenário desfavorável, faz-se um estudo simplificado com o propósito de avaliar o tempo de retorno do investimento aplicado na implantação do sistema levando-se em conta apenas o valor inicial de aquisição dos sistemas, uma vez que o mesmo possui uma garantia considerável e tempo médio de vida de vinte anos.

Como no país não há um sistema tarifário que contemple os sistemas eólicos interligados à rede elétrica, utiliza-se o sistemas de *net-metering*, empregado nos EUA e em alguns países da Europa, onde o preço da energia produzida é equivalente ao preço da energia adquirida junto à concessionária.

Considerando a estimativa do tempo de retorno do investimento no período de 20 anos, uma taxa interna de retorno (TIR) de 7% e acréscimo da tarifa de 7% ao ano. A partir destas definições foi obtido o valor futuro da economia proporcionada pela geração do sistema e do saldo devedor segundo a equação (6.1). (SANTOS, 2009)

$$F = P * (1 + i)^n \quad (6.1)$$

Sendo:

F = valor futuro;

P = valor presente;

I = taxa de crescimento (TIR = 0,07; inflação tarifária anual de 0,07 para o modelo *net-metering*)

n = número de anos até o ano futuro (20).

Utilizando-se o valor de R\$0,33/kWh como a tarifa média de energia elétrica, segundo Alcides Leite (2012), e o valor anual de energia produzido por cada turbina, determina-se a receita anual gerada por cada tipo de aerogerador, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Receita anual gerada por cada tipo de aerogerador

Modelo	Geração média anual (kWh)	Receita anual do sistema (R\$)
<i>Montana</i>	11.000	3630,00
<i>Passaat</i>	2.300	759,00

A quantia corrigida com o valor do tempo de retorno do investimento estipulado dentro do período de 20 anos é de R\$ 264.340,47 para a *Fortis Montana* e de R\$ 131.957,79 para a *Fortis Passaat*. Este valor pode ser decrescido pelo valor da receita gerada corrigida até o valor final de 20 anos.

A Tabela 10 apresenta o saldo final devedor no período estipulado para a implantação da turbina *Montana*.

Tabela 10 - Saldo devedor para a turbina *Montana* segundo modelo *net-metering*

Tempo (ano)	Receita (R\$)	Valor final (R\$)	Saldo devedor(R\$)
0	0	0	264.340,47
1	3.666,63	13.260,47	251.080,00
2	3.923,29	13.260,47	237.819,53
3	4.197,92	13.260,47	224.559,06
4	4.491,78	13.260,47	211.298,59
5	4.806,20	13.260,47	198.038,13
6	5.142,64	13.260,47	184.777,66
7	5.502,62	13.260,47	171.517,19
8	5.887,81	13.260,47	158.256,72
9	6.299,95	13.260,47	144.996,25
10	6.740,95	13.260,47	131.735,78
11	7.212,82	13.260,47	118.475,32
12	7.717,71	13.260,47	105.214,85
13	8.257,95	13.260,47	91.954,38
14	8.836,01	13.260,47	78.693,91
15	9.454,53	13.260,47	65.433,44
16	10.116,35	13.260,47	52.172,97

17	10.824,49	13.260,47	38.912,51
18	11.582,21	13.260,47	25.652,04
19	12.392,96	13.260,47	12.391,57
20	13.260,47	13.260,47	-868,90

Analisando os dados apresentados, exatamente no vigésimo ano o projeto com a *Fortis Montana* terá seu investimento total ressarcido. Isto comprova que o investidor não terá um lucro significativo, uma vez que seu tempo de retorno é o mesmo tempo médio de vida do sistema. No Vigésimo ano o investidor terá um lucro de R\$868,90.

Análogo à anterior, a Tabela 11 apresenta o saldo final devedor no período estipulado.

Tabela 11 - Saldo devedor para a turbina *Passaat* segundo modelo *net-metering*.

Tempo (ano)	Receita (R\$)	Valor final (R\$)	Saldo devedor(R\$)
0	0	0	131.957,79
1	766,67	2.772,67	129.185,12
2	820,33	2.772,67	126.412,45
3	877,76	2.772,67	123.639,78
4	939,20	2.772,67	120.867,10
5	1.004,94	2.772,67	118.094,43
6	1.075,29	2.772,67	115.321,76
7	1.150,56	2.772,67	112.549,09
8	1.231,10	2.772,67	109.776,42
9	1.317,28	2.772,67	107.003,75
10	1.409,49	2.772,67	104.231,08
11	1.508,15	2.772,67	101.458,41
12	1.613,72	2.772,67	98.685,74
13	1.726,68	2.772,67	95.913,07
14	1.847,55	2.772,67	93.140,40
15	1.976,88	2.772,67	90.367,73
16	2.115,26	2.772,67	87.595,05
17	2.263,33	2.772,67	84.822,38
18	2.421,76	2.772,67	82.049,71
19	2.591,28	2.772,67	79.277,04
20	2.772,67	2.772,67	76.504,37

Segundo os valores obtidos matematicamente, investir na turbina *Passaat* momentaneamente é inviável, pois mesmo após 20 anos de funcionamento o sistema ainda terá um saldo devedor de R\$ 76.504,37 em relação ao investimento inicial.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tem como foco avaliar a viabilidade de se instalar turbinas eólicas de pequeno porte em empresas ou residências brasileiras, com o intuito de diversificar os métodos de produção de energia, ter independência energética em relação às concessionárias autorizadas, e, principalmente, auxiliar na sustentabilidade do planeta, uma vez que a energia dos ventos é uma energia limpa que não gera poluição ou resíduos e depende de uma matéria prima inesgotável.

Diante do Mapa Eólico Brasileiro, pode-se averiguar que o Brasil tem um grande potencial para gerar energia através do vento, principalmente na Região Nordeste e ao redor de todo litoral, contudo não há períodos de grande produção de energia. Devido a diversos fatores geográficos, o país apresenta uma velocidade mediana e constante de vento durante todo o ano, diferente de países como Alemanha, EUA e Holanda, pioneiros nesta tecnologia.

Pelo fato do Brasil ter um grande potencial hidroelétrico, políticas de incentivo e financiamentos acessíveis para energia eólica ainda não são uma realidade no país, contudo este cenário tende a mudar nos próximos anos.

Conforme análise realizada, pode-se concluir que a utilização da turbina *Fortis Passaat* atualmente é inviável, uma vez que esta apresenta uma produção de energia muito menor que a *Fortis Montana* e um custo elevado. Em relação a *Fortis Montana*, esta apresenta-se viável. Mesmo proporcionando baixo retorno financeiro, o fato de produzir energia limpa a torna interessante. Para empresas ou comércios a instalação pode trazer um retorno indireto, uma vez que ver turbinas em pleno funcionamento no país é uma novidade e pode atrair clientes curiosos.

Infelizmente o apoio do governo a projetos para pequenos produtores de energia não é uma realidade, o que acarreta em poucas empresas concorrendo por este mercado e um alto custo dos produtos. Outro fator contra esta tecnologia é o fato de ser desenvolvida com base nas características climáticas de outros países e não do Brasil, proporcionando uma baixa eficiência do sistema devido a diferença da velocidade dos ventos.

No momento em que houver políticas de incentivo para empresas investirem neste mercado, mudanças no sistema tarifário nacional, favorecendo os produtores de energias

renováveis e comprando seu excedente energético, e descobertas de novas tecnologias, este método de geração de energia será uma realidade no dia-a-dia da população brasileira.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz de Energia Elétrica, 2005, 2007, 2009. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. 2001, Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Camargo Schubert Engenharia Eólica, TrueWind Solutions, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica/ CEPEL, Brasília, Brasil.

CEPEL, 2001. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Ed. CEPEL, Rio de Janeiro, RJ.

DUBREUIL, Christiane. 2012. Tipos de turbinas eólicas. Disponível em: <http://www.alourgida.com/tipos-de-turbinas-eolicas.html>.

DUTRA, R.M., 2001. Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro. Dissertação de M.Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ , Rio de Janeiro, Brasil, 300 pp.

DUTRA, Ricardo. 2008. Energia Eólica, Princípios e Tecnologias. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_eolica.htm.

FORTI, Wind Energy. Montana. Disponível em: <http://www.fortiswindenergy.com/products/wind-turbines/montana>, acessado em 30 de outubro de 2012.

LAYTON, Julia. 2012. Como funciona a energia eólica. Disponível em: <http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica2.htm>.

LEITE, Alcides. 2012. Levantamento aponta média do valor de Kwh por País. Brasil só perde para europeus. Disponível em: <http://smartgridnews.com.br/levantamento-aponta-media-do-valor-de-kwh-por-pais-brasil-so-perde-para-europeus/>.

MARCONDES, Carolina. 2010. Preço de biomassa e PCHs supera o de eólicas em leilões da Aneel. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/economia /preco-de-biomassa-pchs-supera-de-eolicas-em-leiloes-da-aneel-2959874>.

MENDE, Luciano. 2011. O que é um moinho de vento. Disponível em: <http://www-google.blogspot.com.br/2011/12/o-que-e-moinho-de-vento.html>.

MENDONÇA, Luciana. 2011. Consumo de energia deve crescer 4,8% até 2020. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/57-artigos-e-materias/532-consumo-de-energia-deve-crescer-48-ate-2020.html>.

MONTEZANO, B.E.M., 2007. Modelo Dinâmico de Visualização de um Aerogerador com Velocidade de Rotação Variável e Controle de Passo em VRML. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 137 pp.

PAVINATTO, Eduardo Fiorini, 2005. Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

RAIAMBAL, K., CHELLAMUTH, C., 2002. “Modeling and Simulation of Grid Connected Wind Electric Generating System”, In: Proceedings of IEEE TENCON’02, pp. 1847-1952.

RODRIGUEZ, C. R. C. Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Campinas. 2002.

ROSSI, Pedro Henrique Jochims. Oliveira, Cássia Pederiva de. 2011. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=9>.

SANTOS, I. P. Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residências e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista. Dissertação. UFSC. 2009.

SIEB, MEYER. 2012. Aeocon for Small Scale Wind Turbines. Disponível em: <http://www.sieb-meyer.de/products/items/aeocon.html>.

SILVA, Dorinda da. 2009. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.slideshare.net/Dorindasilva/histria-da-energia-elica>.

SILVA, Claudia Lucia Pimentel Martins da. 2012. Ato Declaratório Executivo Cosit nº 32, de 1º de novembro de 2012. Disponível em: <http://www.receita.fazenda.gov.br/legislacao/AtosExecutivos/2012/COSIT/ADCosit32.htm>.

SHEPHERD, D.G.,1994, “Historical Development of the Windmill”. In Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, SPERA, S.A, (ed), 1 ed. New York, ASME Press, pp 1-46.

STARRS, J; WENGER, J. Policies to Support a distributed energy system. Renewable Energy Policy Project. 1998.

Wind Power Monthly, 2006. Wind Statistic. Disponível em: <http://www.windpower.com/statistics.html>.

World Wind Energy Association – WWEA, 2009. Wind Energy International 2007-2008. ISBN 81-7525-641-9 ed. WWEA, New Delhi, India.