

LAWRENCE CARDOSO BORGES

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE ENERGIA ELÉTRICA DISTRIBUÍDA UTILIZANDO PEQUENOS AEROGERADORES. ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ASPECTOS PARA AMPLIAR A VIABILIDADE

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Adriane Prisco Petry

Porto Alegre
2010



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE ENERGIA ELÉTRICA
DISTRIBUÍDA UTILIZANDO PEQUENOS AEROGERADORES. ANÁLISE DOS PRIN-
CIPAIS ASPECTOS PARA AMPLIAR A VIABILIDADE

LAWRENCE CARDOSO BORGES

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. _____
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. _____
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. _____
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2010

de modo especial, à minha família pelo apoio, e à minha esposa Milene pelo incentivo e ajuda na conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, de modo especial à todos os meus professores que passaram seus conhecimentos para o meu aprendizado.

à minha orientadora, *Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry*, por me disponibilizar seu tempo, material e apoio para a conclusão deste.

ao meu pai *Alexandre*, minha madrastra *Ana*, à minha mãe *Gracy* e minha irmã *Lauren*, que sempre apoiaram meus estudos.

ao meu sogro *Raimundo* e à minha sogra *Ana Maria*, que me incentivaram.

aos meus amigos e colegas, que conviveram comigo durante a minha graduação.

“A maioria de nós prefere olhar para fora e não para dentro de si mesmo”

Albert Einstein

BORGES, L. C. Estudo de viabilidade técnica e econômica de geração de energia elétrica distribuída, usando pequenos aerogeradores. Análise dos principais aspectos para ampliar a viabilidade. 2009. 19f Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

Considerando a crescente preocupação com o impacto ambiental da geração de energia elétrica, o aumento do consumo e a relevância do uso de energias renováveis, apresenta-se um estudo de viabilidade técnica e econômica para o uso de pequenos aerogeradores. Este trabalho tem como objetivo o estudo da viabilidade técnica e econômica de geração de energia elétrica distribuída utilizando aerogeradores de pequeno porte e análise de aspectos que possam ampliar sua viabilidade. Para esta análise, é considerado o local de implantação do sistema, um prédio situado em zona comercial em Porto Alegre onde existem dados de medições de vento publicados, e a escolha dos aerogeradores. Para a escolha, selecionam-se três aerogeradores com características diferentes, de diferentes fabricantes e com o auxílio do programa computacional livre Alwin, obtém-se a previsão de energia gerada em cada situação. Define-se o tipo de sistema a utilizar, conectado à rede elétrica do prédio. Por fim, é apresentado um estudo de viabilidade econômica do aerogerador com melhores resultados no estudo de viabilidade técnica, considerando as diretrizes econômicas do Regime Especial de Tributação para o Incentivo ao Desenvolvimento e à Produção de Fontes Alternativas de Energia Elétrica (REINFA). Neste estudo, apresenta, para cada caso, o fluxo de caixa do sistema, o qual é o um indicador para cálculos de viabilidade econômica. Após obter os resultados, sugere-se então, uma ampliação de viabilidade técnica e econômica através do aumento da velocidade do vento devido à geometria do prédio.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica, Aerogeradores, Viabilidade Econômica, Viabilidade Técnica, Energia Elétrica Distribuída.

BORGES, L. C. Study of technical and economic feasibility of distributed power generation using small wind turbines. Analysis of the key aspects to extend viability. 2009. 19f Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

Considering the growing concern over the impact of power generation, consumption growth and the importance of renewable energy use, began a study of technical and economic feasibility for the use of small wind turbines. This paper aims to study the technical and economic feasibility of distributed power generation using small wind turbines, and based on the acquired data, analyze the main aspects that can increase its viability. For this analysis, we considered the site of implantation, a building located in commercial area in Porto Alegre where data are published measurements of wind, and the choice of wind turbines. Next, it selects three wind turbines with different features, from different manufacturers and using a computer program Alwin, we obtain the estimates of energy generated in each situation. Define the type of system to use, if connected directly into the power grid of the building. Finally, we did a study of economic feasibility of wind turbines, considering the economic guidelines of the Special Taxation Incentives for the Development and Production of Alternative Sources of Electric Energy (REINFA). This study shows, for each case, the cash flow system, which is an indicator for calculations of economic viability. After getting results, it is suggested then makes an expansion of technical and economic viability by increasing the wind speed due to the geometry of the building.

KEYWORDS: Wind Energy, Wind Generators, Economic Feasibility, Technical Feasibility, Distributed Energy.

SUMÁRIO

ABSTRACT.....	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 Potência do vento.....	2
2.2 Distribuição de frequência do vento	3
3. METODOLOGIA DE ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA.....	4
3.1. Escolha do local.....	4
3.2. Realização de medições de vento no local escolhido e definição do comportamento e características do vento no local.....	5
3.3. Escolha dos aerogeradores.....	5
3.4. Previsão da energia gerada.....	6
3.5. Escolha de conexão à rede e definição do projeto de conexão.....	7
3.6. Determinação dos investimentos necessários à implantação do sistema.....	7
3.7. Estudo de viabilidade econômica	7
4. PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA DESCENTRALIZADA INSTALADO NUM PRÉDIO UTILIZANDO PEQUENO AEROGERADOR.....	7
4.1. Escolha do local.....	7
4.2. Potencial eólico.....	8
4.3. Seleção de turbinas	10
4.4 Curva de potência dos aerogeradores.....	11
4.5 Estimativa de energia gerada	12
5. ANÁLISE ECONÔMICA	12
6. AMPLIAÇÃO VIABILIDADE TÉCNICA	14
7. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	15

8. REFERÊNCIAS.....	16
9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	17
APÊNDICE.....	17

1. INTRODUÇÃO

A utilização da energia eólica vem crescendo em todo o mundo nos últimos anos devido ao seu baixo potencial de agressão ao meio ambiente. O aumento da demanda de energia elétrica e conseqüentemente aumento da poluição, são os principais fatores que contribuíram para este crescimento.

Através, da lei N° 10.438 de 26 de abril de 2002 e revisada pela lei N° 10.762 de 22 de novembro de 2003, foi lançado o Programa de Incentivo às Fontes de Energia – PROINFA, o qual designa a compra de 3300 MW de energia elétrica de fonte renovável no sistema nacional integrado (SIN), com o objetivo de aumentar a oferta de energia elétrica, devido ao crescimento da demanda de energia. (BRASIL, 2002). Com isso o Brasil teve um crescimento em investimentos em pesquisa, desenvolvimento e implantação de sistemas de geração de energia eólica. Estão para serem aprovadas este ano as diretrizes econômicas do Regime Especial de Tributação para o Incentivo ao Desenvolvimento e à Produção de Fontes Alternativas de Energia Elétrica (REINFA). Este estabelece incentivos à produção de energia a partir de fontes alternativas renováveis e biocombustíveis; fomenta a realização de pesquisas relacionadas a essas fontes de energia, aos veículos automóveis elétricos e híbridos, ao armazenamento de energia elétrica e ao uso do hidrogênio e do ar comprimido para fins energéticos; institui o Fundo Nacional para Pesquisa e Desenvolvimento das Fontes Alternativas Renováveis. Com isso há uma expectativa de que diminuam os custos na implantação de sistemas de geração descentralizada de energia, ocasionando um crescimento intenso na utilização destes sistemas. Exemplos são prédios que possuem aerogeradores acoplados à sua estrutura conforme apresentado na figura 1.

Esta tendência na utilização de energia eólica pode ser observada nos diferentes tipos de pequenos aerogeradores que podem ser utilizados como fontes de energia distribuídas não só em ambientes isolados, mas também em meio urbano. A aplicação que está sendo bastante utilizada é integrá-los à estrutura de edifícios em áreas urbanas. Na maioria destes casos estes pequenos aerogeradores têm a finalidade de suprir a demanda de energia de sistemas auxiliares dos prédios, tais como, luzes dos corredores, elevadores, com conseqüente redução de consumo de energia elétrica. Para todas as aplicações é necessário um estudo de viabilidade, que com base em dados adquiridos no local, irá definir no caso do sistema ser considerado viável qual será a melhor configuração.



Figura 1 – Turbinas eólicas instaladas no prédio “Bahrain World Trade Centre”.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Energia Eólica é a energia do vento, isto é, energia cinética do ar em movimento. Os ventos são gerados pela incidência desigual da radiação solar na superfície terrestre ocasionando uma diferença de temperatura entre as regiões equatorial e polar e conseqüentemente o movimento do ar (CUSTÓDIO, 2002) e também é causado pelo movimento de rotação da terra. (ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2002)

A geração de energia distribuída é a geração elétrica junto ou próxima do(s) consumidor(es), seja em sistemas isolados ou integrados à rede, com potências normalmente iguais ou inferiores a 30 MW. O uso de geração distribuída apresenta vantagens sobre a geração centralizada, como a economia em investimentos em transmissão e redução de perdas nestes sistemas, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica. Também permite a implantação de unidades geradoras mais adaptadas às necessidades locais, minimizando o impacto ambiental e a mobilização de capital.

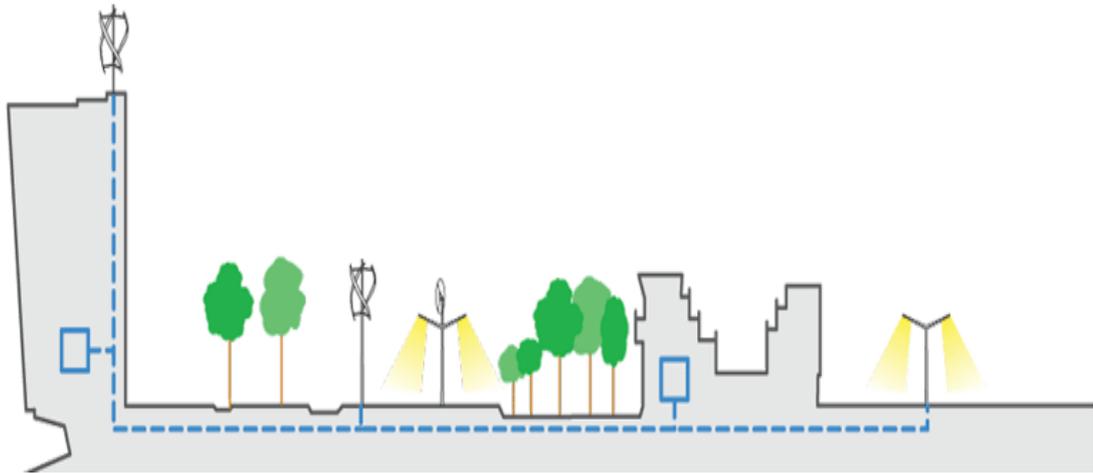


Figura 2.1 – Exemplo de energia distribuída utilizando pequenos aerogeradores (QUIETREVOLUTION, 2010)

2.1 POTÊNCIA DO VENTO

A potência do vento é função da velocidade do vento v através de uma área A (PETRY), e pode ser expressa por:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.1)$$

onde:

P – potência do vento;

ρ – massa específica do ar;

A – área da seção transversal do rotor da turbina eólica;

v – velocidade do vento.

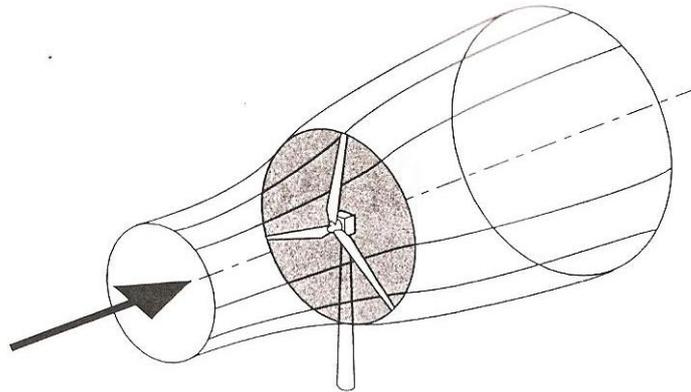


Figura 2.2 – Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal (CUSTÓDIO, 2002).

Entretanto uma turbina eólica poderá extrair apenas uma parcela da energia do vento (CUSTÓDIO, 2002). A relação entre a potência extraída do vento e a potência disponível no vento denomina-se de coeficiente de potência C_p e é definido por:

$$C_p = \frac{P_{\text{extraída}}}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (2.2)$$

onde:

C_p – coeficiente de potência;

ρ – massa específica do ar;

v – velocidade do vento a qual incide na turbina eólica;

$P_{\text{extraída}}$ – quantidade de energia passível de ser obtida;

Em condições ideais, o máximo valor que o C_p pode atingir é $16/27$, ou seja, 59,3% da energia do vento. Este valor é conhecido como coeficiente de Betz.

2.2 DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO VENTO

O estudo do potencial eólico de uma região é realizado a partir de medições do vento no local. Os dados de velocidade de vento recebem tratamento estatístico e são normalmente apresentados na forma de valores médios e curvas de distribuição. A distribuição do vento pode ser representada por uma função probabilística (CUSTÓDIO, 2002). De acordo com o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2002), a função probabilística que melhor representa a distribuição do vento é a função de Weibull, Ela obedece à equação 2.3.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (2.3)$$

onde:

v – velocidade do vento;

c – fator de escala;

k – fator de forma.

O fator de escala “ c ” representa a escala da distribuição e está relacionado com a velocidade média, a qual pode ser aproximada por:

$$V_{méd} \cong (0,90 \pm 0,01)c \quad (2.4)$$

O parâmetro “ k ” é o parâmetro de forma da distribuição e é relacionado com o desvio padrão. (MATTUELLA, 2005)

A função de Weibull apresenta alguns casos especiais em função do parâmetro de forma k .

- $k = 1,0$: distribuição exponencial;
- $k = 2,0$: distribuição de Rayleigh;

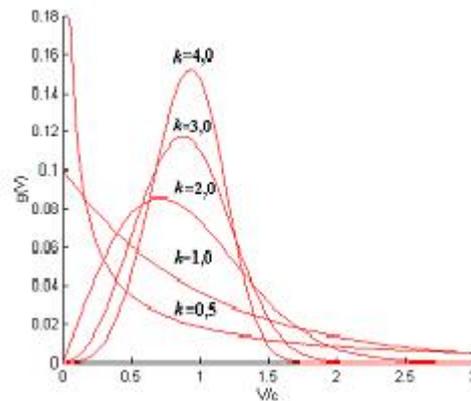


Figura 2.3 – Influência do parâmetro k na curva distribuição de Weibull (PETRY, 2007).

Na falta de dados para o k , usa-se Rayleigh, que melhor representa a distribuição do vento.

3. METODOLOGIA DE ESTUDO DA VIABILIDADE

Para o estudo de viabilidade técnica de pequenos aerogeradores, devem ser considerados os seguintes parâmetros:

3.1. ESCOLHA DO LOCAL

Para a instalação do aerogerador devem-se observar alguns fatores importantes na escolha do local, os quais devem ser atendidos de forma satisfatória para que o projeto seja viável. O local escolhido deve possuir espaço suficiente para a instalação do equipamento, acessibilidade para manutenção e deve obedecer à altura máxima permitida especificada em plano diretor, no caso do local escolhido ser o topo de um prédio. O local deve possuir uma baixa rugosidade superficial, bem como ser livre de obstáculos, para que a velocidade no rotor seja a maior possível. Devem também ser consideradas as restrições ambientais e também a autorização de órgãos públicos, para a instalação do aerogerador. A acessibilidade deve ser avaliada a partir do local desembarque do equipamento, seja um Porto ou Aeroporto (no caso do equipamento vindo de outro local), até o local de instalação.

3.2. REALIZAÇÃO DE MEDIÇÕES DE VENTO NO LOCAL ESCOLHIDO E DEFINIÇÃO DO COMPORTAMENTO E CARACTERÍSTICAS DO VENTO NO LOCAL

Para se obter medições mais precisas, deve-se instalar o anemômetro na altura que vai ser instalada a turbina, para o caso de medições com apenas um anemômetro. No caso de dois anemômetros, deve existir uma diferença de altura entre eles, para que seja possível estimar a rugosidade do local devido às diferenças nos resultados obtidos. O anemômetro mais baixo deve ajustar-se em uma altura mínima para que o vento não seja influenciado por obstáculos (árvores e casas). A distância entre dois anemômetros deve ter pelo menos de 15 a 20m. Na área escolhida é necessário fazer uma campanha de medições dos ventos no local escolhido durante 12 meses no mínimo. Feitas as medições, os dados obtidos devem ser analisados estatisticamente para se determinar o comportamento do vento no local.

3.3. ESCOLHA DOS AEROGERADORES

Nesta etapa, consideram-se os seguintes aspectos: fabricação e assistência técnica no país; tecnologia adotada; modelos e tamanhos disponíveis; infra-estrutura para transporte e montagem; fator de capacidade no local; custos de instalação e operação.

3.3.1 Tecnologia a ser empregada

As turbinas eólicas são máquinas que transformam energia cinética dos ventos em potência mecânica ou elétrica, através da rotação de suas pás. A classificação das turbinas pode ser feita de acordo a orientação do eixo do rotor. As denominadas Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) possuem pás que giram num plano perpendicular à direção principal do vento. As Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV) possuem suas pás girando num plano paralelo à direção do vento.



(a) Turbina de eixo vertical



(b) Turbina de eixo horizontal

Figura 3.1- Exemplos de turbinas de pequeno porte de eixo horizontal (a) e eixo vertical (b).

As TEEH necessitam de um sistema posicionador pra melhor captação do vento, são de difícil manutenção devido à distância entre os mecanismos e o solo, os perfis aerodinâmicos das pás são mais complexos dificultando sua fabricação, possuem maior eficiência na conver-

são da energia e no fator de capacidade, e um melhor aproveitamento do vento com baixa velocidade.

Já as TEEV possuem capacidade de captar ventos de todas as direções, são de fácil manutenção devido à distância entre os mecanismos e o solo, suas pás possuem um custo menor de fabricação, alguns de seus modelos necessitam de um sistema de partida para o acionamento em baixas velocidades, e apresentam menor vibração.

Podem também ser classificadas pelo tipo de sistema que limita a extração de potência à potência nominal da turbina, o sistema de controle estol (stall) e o de controle de passo (pitch). O sistema de controle por estol (“Stall”) faz com que a velocidade angular do rotor do aerogerador seja controlada pela eficiência do aerofólio das pás do mesmo, mais simples e de menor custo que o sistema de controle de passo (“Pitch”), que faz com que a velocidade angular do rotor do aerogerador seja controlada através do giro das pás no seu eixo longitudinal, é um equipamento mais complexo, porém mais leve e usualmente com maior eficiência.

3.3.2 Seleção das turbinas

Deve ser feito um comparativo entre os modelos disponíveis e que possuam as características necessárias para o local em que vai ser instalado o aerogerador. A determinação dos tipos de aerogeradores a utilizar no estudo, esta diretamente relacionada com a viabilidade do sistema em si. Após serem levados em conta os aspectos citados acima.

3.4. PREVISÃO DE ENERGIA GERADA

O fator de capacidade de um aerogerador é a relação entre a energia gerada e a capacidade de produção. Depende do perfil do vento no local da instalação dos aerogeradores, que está representado na equação 3.1 (CUSTÓDIO, 2002).

$$F_C = \frac{E_{estimada}}{E_{nominal}} \quad (3.1)$$

Onde:

F_C – Fator de capacidade;
 $E_{estimada}$ – Energia estimada;
 $E_{nominal}$ – Energia Nominal.

A energia estimada poder ser calculada de acordo com a equação:

$$E = \int P_n \cdot dt \quad (3.2)$$

Onde:

E – Energia gerada
 P_n – Potência nominal da máquina

A energia anual estimada é calculada através da equação:

$$E_a = \int P(V(t)) \cdot dt$$

Onde:

$P(V(t))$ – Potência em função da velocidade do vento– obtida da curva característica da máquina.

3.5. ESCOLHA DA CONEXÃO A REDE E DEFINIÇÃO DO PROJETO DE CONEXÃO

Deve ser escolhida a melhor forma de conexão com o sistema elétrico da região, para tal deverá ser desenvolvido um projeto de conexão, podendo haver a conexão em alimentador ou construção de uma linha de transmissão para conexão no sistema elétrico nacional.

3.6. DETERMINAÇÃO DOS INVESTIMENTOS NECESSÁRIOS À IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA

Para se determinar os investimentos necessários para implantação de um sistema de geração de energia distribuída utilizando pequenos aerogeradores, devem ser considerados os custos como: aerogeradores, conexões, transformadores, acessos, montagem, comissões, impostos e demais custos.

3.7. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para o estudo de viabilidade econômica, deve se avaliar o custo do projeto. Este é a soma de todos os custos em um dado período de tempo, ajustados ao valor presente. Podem ser divididos em duas categorias: custos de investimento, ou capital inicial, e custos operacionais.

Os custos de investimentos são:

- Equipamento
- Obras civis
- Execução do projeto
- Conexão à rede
- Medição
- Acesso

Os custos operacionais são:

- Manutenção preventiva
- Manutenção corretiva

Devem-se escolher critérios para determinar se o sistema é viável. Estes critérios são:

- Pay Back Simples (Pay Back) – Indica quanto tempo é necessário para recuperar o capital investido.
- Valor Presente Líquido (VPL) – Valor dos fluxos financeiros na presente data.

4. PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA DESCENTRALIZADA INSTALADO NUM PRÉDIO UTILIZANDO PEQUENO AEROGERADOR.

4.1. ESCOLHA DO LOCAL

Neste caso estudado, o local escolhido é um prédio na Av. Carlos Gomes, cidade de Porto Alegre. Para o qual existem dados de medições de vento publicados. O prédio possui 10 andares,

e sua localização na avenida é a mais alta, o que torna o regime de vento mais uniforme, melhorando o desempenho da turbina. Devido à rotação das pás da turbina e da pressão dinâmica do vento incidente na estrutura, uma vibração pode ser gerada e transmitida da turbina para a estrutura do edifício, afetando sua integridade. Uma avaliação junto a um engenheiro de estruturas deve ser feita, pois poderá haver a necessidade de reforços na estrutura original. Fundações para turbinas de pequeno porte são feitas em blocos de concreto reforçado (SMEATON, 2003). Quanto ao ruído, por localizar-se em zona comercial, a lei municipal determina que não exceda 60 dB à noite e 75 dB durante o dia. Não existem restrições ambientais para a instalação de turbinas eólicas de pequeno porte neste local. Como estamos avaliando pequenos aerogeradores, a acessibilidade é mais fácil, tornando seu custo menor.



Figura 4.1 – Localização da turbina e do anemômetro (WENZEL, 2006).

4.2. POTENCIAL EÓLICO

Na avaliação do potencial eólico do local, utilizou-se como base o artigo “Estudo da Implementação de Sistema Eólico em Prédio da Empresa Auxiliadora Predial” (WENZEL, 2006) publicado no IV Congresso Nacional Engenharia Mecânica, em que foi analisado o potencial eólico de um prédio igual ao que vamos utilizar na nossa análise. De acordo com este artigo, foi instalado um sistema anemométrico para medir as velocidades de vento e armazená-las, para se obter uma estimativa do potencial eólico do local.

Com base nos dados do artigo anteriormente citado, a velocidade média neste local medida através do sistema anemométrico, é de 3,7 m/s, com máxima de 6 m/s. A figura 4.2 demonstra estes dados referentes às médias mensais.



Figura 4.2 – Velocidades médias mensais com instalação do anemômetro (WENZEL, 2006).

Os dados de medições de vento do 8º DISME, localizado em Porto Alegre estão demonstrados na figura 4.3.

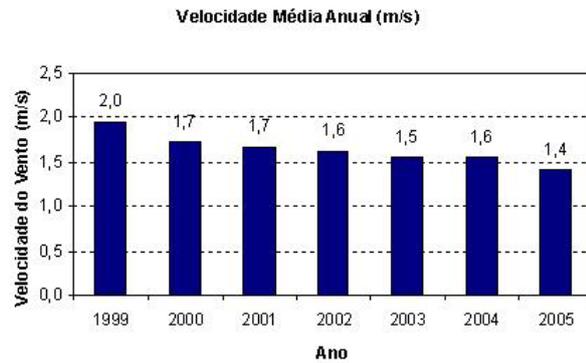


Figura 4.3 – Velocidades médias anuais registradas - 8º DISME

A diferença entre as velocidades pode ser atribuída há alguns fatores como, altura, terreno, e principalmente a turbulência gerada pela estrutura do prédio. Um prédio pode gerar grandes níveis de turbulência, devido a sua estrutura ou pode ocorrer um acréscimo da velocidade do vento, chegando a 1m/s (CAMPBELL, 2001).

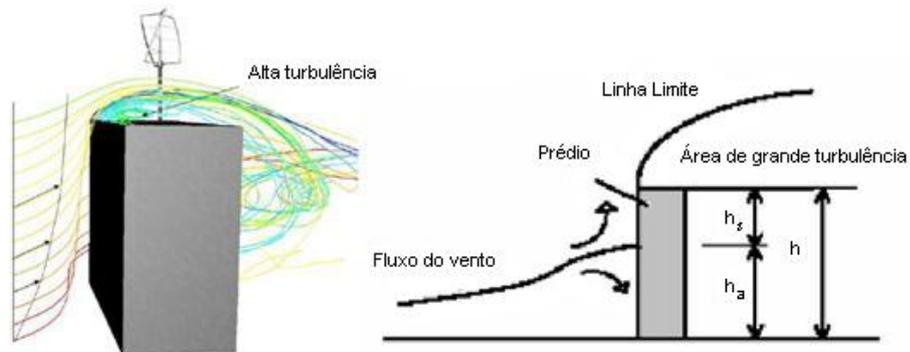


Figura 4.4. Fluxo do vento ao redor do prédio e representação da linha limite (WENZEL, 2006).

Ocorrem grandes níveis de turbulência no vento devido à sua estrutura de prédios, conforme demonstra a figura (4.4), portanto deve-se instalar a turbina acima da região de grande influência da turbulência, pois os ventos são mais uniformes.

Com base nos dados do DISME, verificamos que a direção predominante do vento de Porto Alegre é sudeste.

Utilizando o software ALWIN, foi obtida a função de distribuição de Rayleigh para a velocidade média 3,7 m/s, rugosidade Z_0 é de 2 metros (ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2002), e a altura de instalação da turbina estimada em 40 metros. O resultado pode ser visualizado na figura 4.5, que demonstra a distribuição da velocidade do vento no local estudado.

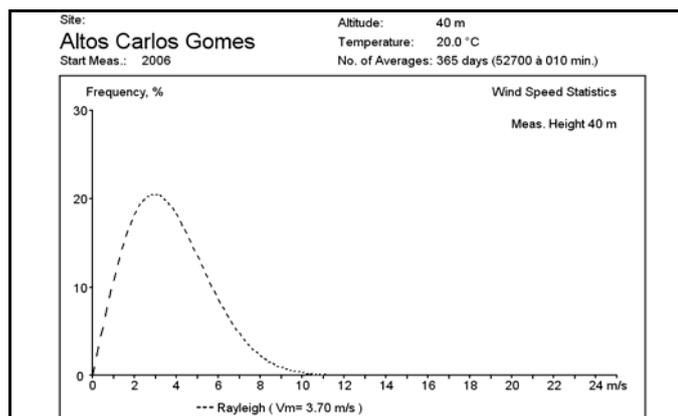


Figura 4.5 – Distribuição de velocidades de vento

4.3. SELEÇÃO DAS TURBINAS

Para instalação num prédio, inúmeros fatores devem ser levados em conta, porém os mais importantes são tamanho e capacidade de geração de energia. As turbinas apresentadas neste estudo são de pequeno porte, com potência nominal na faixa de 1 kW à 6 kW, nas quais o diâmetro do rotor varia de 1 m à 5 m podendo ser instaladas com torres de até 10 m. Turbinas de eixo vertical (TEEV) são mais robustas sendo compatíveis com os projetos para serem instaladas em topos de prédios assim como esteticamente são preferidas por arquitetos e usuários. Sua integração é mais aceitável do que as turbinas de eixo horizontal (TEEH) e sua segurança é maior devido a sua reduzida vibração, além de aproveitarem melhor o vento turbulento existente no topo de prédios (OVERMOOR, 2003).

Para esta aplicação foram selecionados os seguintes modelos de turbinas eólicas para serem avaliados:

- UGE-4K
- VERNE555
- HS2K

A turbina UGE-4K é fabricada pela Urban Green Energy. Sua potência nominal é de 4kW, sua velocidade de partida é de 3m/s e sua velocidade nominal é de 12 m/s. Possui um rotor de diâmetro de 4,2 metros e uma torre com altura de 3 metros. Foi selecionado este modelo por ser uma turbina de eixo vertical, que possui baixo ruído e capacidade de captação de ventos em todas as direções, ideal para a instalação em zonas urbanas.

A turbina VERNE555 é fabricada pela Enersud. Sua potência nominal é de 6 kW, sua velocidade de partida é de 2,2 m/s e sua velocidade nominal é de 12 m/s. Possui um rotor de diâmetro de 5,55 metros, uma torre com altura de 5 metros e seu eixo é horizontal. Este modelo é fabricado no Brasil, o que torna mais viável em relação à manutenção e custo de equipamento, tendo em vista que a nova lei que esta para ser aprovada. De acordo com a nova lei, será cobrada taxa de importação sobre equipamentos similares aos produzidos no Brasil.

A turbina HS2K é fabricada pela China Best Products Wind Turbine Generators. Sua potência nominal é de 2 kW, sua velocidade de partida é de 3 m/s e sua velocidade nominal é de 9 m/s. Possui um rotor de diâmetro de 3,5 metros, uma torre com altura de 3 metros e seu eixo é horizontal. Este modelo foi selecionado devido ao seu baixo custo e possuir compra direta pela internet. Porém seu fabricante não fornece muitas informações sobre o produto e não possui revendas autorizadas, o que dificulta sua manutenção.



Figura 4.7 – UGE-4K



Figura 4.8 – HS2K



Figura 4.9 – VERNE555

4.4 CURVA DE POTÊNCIA DOS AEROGERADORES

A curva de potência de um aerogerador é o gráfico que correlaciona a potência gerada com a velocidade do vento. Este gráfico demonstra qual a faixa de utilização com relação à velocidade do vento, desde sua velocidade de partida até sua velocidade máxima de funcionamento. Esta curva normalmente é informada pelo fabricante.

As curvas de potências utilizadas neste trabalho foram obtidas através dos sites dos fabricantes, e foram inseridas no programa ALWIN para possibilitar a estimativa de energia gerada por cada turbina. As curvas de potência são apresentadas abaixo:

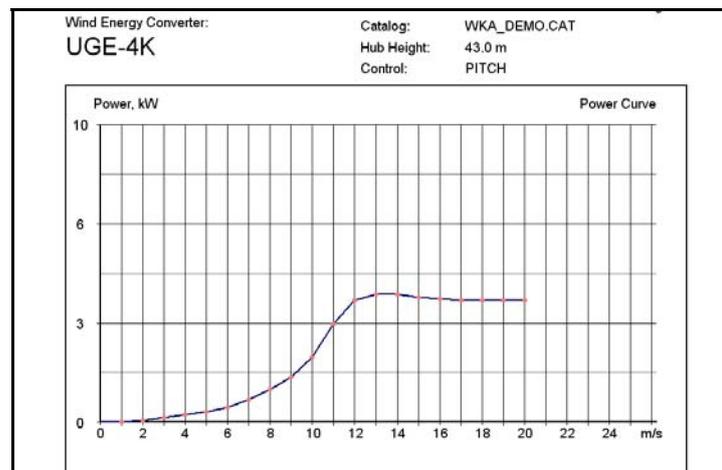


Figura 4.10 – Curva de Potência Turbina UGE-4K

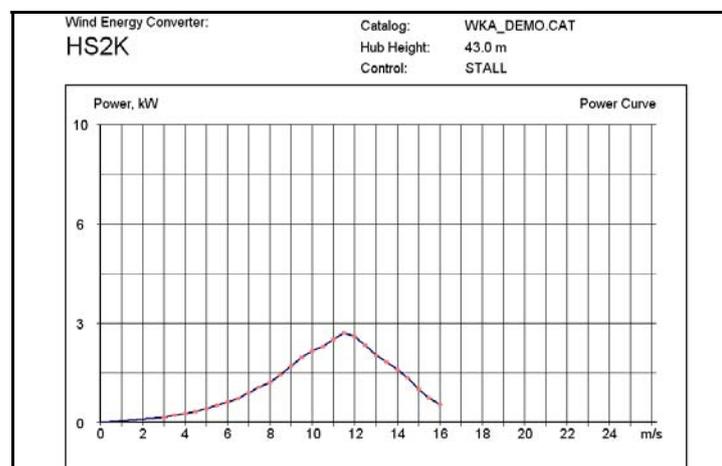


Figura 4.11 – Curva de Potência Turbina HSK2

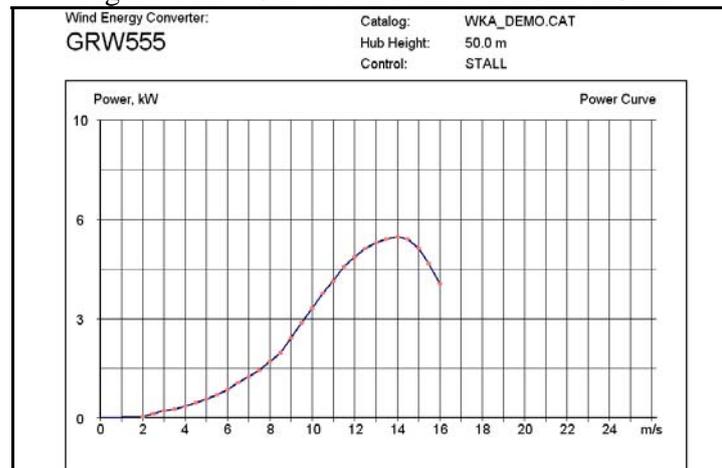


Figura 4.12 – Curva de Potência Turbina VERNE555

4.5 ESTIMATIVA DA ENERGIA GERADA

Através do programa livre ALWIN, é possível obter o fator de capacidade do aerogerador adotado. Para isso, são necessários os dados medidos no local conjuntamente com os dados da curva de potência do aerogerador e o valor da rugosidade do local. Em função do fator de capacidade identifica a energia produzida.

A tabela a seguir apresenta a energia anual gerada por cada aerogerador e o fator de capacidade de cada aerogerador durante o período de um ano, demonstrando que o aerogerador da Enersud obteve uma estimativa de energia maior que os demais. O maior fator de capacidade foi obtido para a máquina de menor potencia nominal, contudo a energia gerada é inferior.

Tabela 4.1 - Energia Anual Gerada por cada Aerogerador

Fabricante	Modelo	Potência (W)	Fator de Capacidade (%)	Diâmetro Rotor (m)	Altura Cubo (m)	Energia Anual Gerada (MWh)
Enersud	VERNE555	6000	8,3	5,55	45	4,4
HS2K	3kW	3000	12,6	3,2	43	3,3
Urban	UGE-4K	4000	6,6	4,2	43	2,5

Os dados acima se referem apenas à energia gerada anualmente por cada aerogerador. Os resultados obtidos na tabela 4.1 apresentam a estimativa da produção anual de energia elétrica. Foi considerada uma eficiência de 92% e um fator de disponibilidade de 97%.

5. ANÁLISE ECONÔMICA

Para se determinar a viabilidade econômica, utilizou-se uma planilha de custos acrescentada a taxa de inflação, demonstrada em anexo. Nesta planilha foram consideradas as exigências do Regime Especial de Tributação para o Incentivo ao Desenvolvimento e à Produção de Fontes Alternativas de Energia Elétrica (REINFA), que de acordo com o Artigo 8º, § 1º, as empresas distribuidoras de energia elétrica deverão priorizar a aquisição de energia limpa dos referidos produtores independentes, acrescentando a energia produzida ao seu potencial energético, remunerando não menos do que paga pela energia de outras fontes.

O prédio analisado neste estudo possui um sistema auxiliar de energia composto por 100 lâmpadas de 40W, 4 elevadores de 500W e 4 motores para acionamento dos portões da

garagem (300W). Foi utilizada uma estimativa de uso dos equipamentos elétricos tendo em vista que as lâmpadas possuem sensor de presença e tanto os elevadores quanto os portões não estão em contínua utilização.

Os custos dos aerogeradores foram adquiridos através de contato com os fabricantes, bem como, dos equipamentos necessários para a aplicação direta para a rede pública de eletricidade, reduzindo os gastos mensais de energia elétrica do usuário, utilizando-se uma configuração conhecida como “Grid-Tie”.

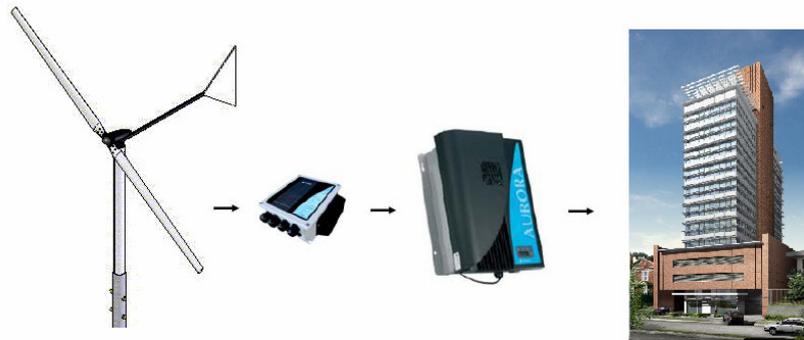


Figura 5.1- Sistema Grid-Tie (WENZEL, 2006).

O cálculo do custo de instalação é diretamente relacionado à potência do equipamento analisado, tendo em vista que quanto mais potente, mais pesado é o aerogerador e maior também será a vibração.

A máquina selecionada foi o modelo VERNE555 da Enersud, pois obteve uma estimativa de energia gerada maior que os demais, e apresenta maior confiabilidade quando comparado ao modelo HS2KA. A tabela 5.1, demonstra o custo da máquina selecionada:

Tabela 5.1 – Custo do aerogerador

Modelo	Potência (W)	Fator de Capacidade (%)	Custo do gerador (R\$)	Custo do equipamento (R\$)	Custo instalação (R\$)	Custo total	Energia Anual Gerada (MWh)
VERNE555	6000	8,3	29500,00	8000,00	14750,00	52550,00	4,4

Um fluxo de caixa foi elaborado com os dados de energia prevista gerada e fator de capacidade obtido, conforme apresentado na tabela 5.2. O resultado foi um Lucro Líquido anual do projeto após 20 anos de R\$ 337,37, muito baixo, tendo em vista o gasto com energia. Nestas condições, energia eólica disponível, custos e Fator de Capacidade da máquina, o projeto não é recomendado, a ampliação da viabilidade do projeto é discutida no próximo item.

Tabela 5.2 – Fluxo de caixa-VERNE555

Energia de Referência	4,359064	MWh		Investimento			
Fator De capacidade	0,09			Total	52.250,00		
Potencia da Máquina	0,006	MW		Valor unitario	29500,00	R\$/kWn	
Numero de Máquinas	1			Capital próprio	10.450,00		
Periodo do Contrato	20	anos		Emprestimo	41.800,00	80%	
Coefficiente de Disponibilidade	97%	%		Taxa de juros	4%		
Coefficiente de Rendimento	95%	%		Periodo emprestimo	14	anos	
Valor de comercialização	439	R\$/MWh		Instalação	14750,00		
				Equipamentos	8000,00		
Demonstrativo Resultado Exercício			ano1	ano2	ano7	ano20	
Energia Comercializada			1.875,36	1.875,36	1.875,36	1.875,36	
Creditos de Carbono							
PIS/COFINS							
RECEITA OPERACIONAL			1.875,36	1.875,36	1.875,36	1.875,36	
O&M	56	R\$/kW-ano	0,00	0,00	336,00	336,00	
Perdas	2%		0,00				
Taxa Aneel	0,50%		9,38	9,38	9,38	9,38	
Depreciação outros-20 anos	5%		783,75	783,75	783,75	783,75	
Depreciação aerogeradores	10%		2.625,00	2.902,10	2.902,10		
Arrendamento	1%		18,75	18,75	18,75	18,75	
Recultivação	4	R\$/kW-ano	24,00	24,00	24,00	24,00	
Impostos							
Seguros	1%		365,75	365,75	365,75	365,75	
Custo de Transmissão da Energia	0	R\$/kW-mês	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sub-total			3.826,63	4.103,73	4.439,73	1.537,63	
Lucro operacional			-1.951,27	-2.228,37	-2.564,37	337,73	
Juros			1.672,00	1672	1114,6667		
Lucro Antes IR			-3.623,27	-3.900,37	-3.679,04	337,73	
IR			0,00	0,00	0,0	0,0	
CSLL			0,00	0,00	0,00	0,00	
Lucro líquido			-3.623,27	-3.900,37	-3.679,04	337,73	
Fluxo de caixa			Ano 01	Ano 02	Ano 07	Ano 20	
Lucro líquido			-3.623,27	-3.900,37	-3.679,04	337,73	
Depreciações			783,75	783,75	783,75	783,75	
Depreciação aerogeradores			2.625,00	2.902,10	2.902,10		
Amortização					3483,3333		
Financiamento			41.800,00				
Invest total			52.250,00				
Fluxo de Caixa líquido			-10.664,52	-214,52	-3.476,52	1.121,48	
Consumo Energia do Prédio	740	kW-mês					
Lâmpadas 40W	400		100	unidades			
Elevadores	250		4	unidades			
Portões	90		4	unidades			
Consumo Energia do Prédio	324,86	R\$	1.480,00				
Consumo Energia do Prédio Anual	8,88	MW					
Consumo Energia do Prédio Anual	3898,32	R\$					
Gasto anual total do sistema elétrico			14.562,84	4.112,84	2.776,84		

6. AMPLIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Alternativas para ampliar a viabilidade do projeto são: o uso de um equipamento que produza uma quantidade de energia elevada, com alto fator de capacidade, a redução dos custos de implantação e a consideração da compra da energia excedente pela concessionária. Outro caminho é a busca de maior potencial eólico, em regiões com mais ventos ou aumentando o potencial localmente, conforme discutido a seguir.

Conforme citado anteriormente, um prédio pode gerar grandes níveis de turbulência, devido a sua forma ou pode ocorrer um acréscimo da velocidade do vento, chegando a 1m/s. Estudos sobre o desenvolvimento de projetos arquitetônicos que visam utilizar a influência da geometria

do prédio no escoamento de ar (vento) local demonstram que é possível obter um acréscimo de até 1m/s na velocidade média do vento.

Foi realizado um novo estudo utilizando a turbina que obteve o melhor desempenho no estudo anterior, para avaliar a diferença causada por um aumento da velocidade média do vento de 1m/s. Com isso a previsão de energia gerada aumentou significativamente junto com o fator de capacidade, para 7,7MW e 14,5% respectivamente, conforme a figura 6,1.

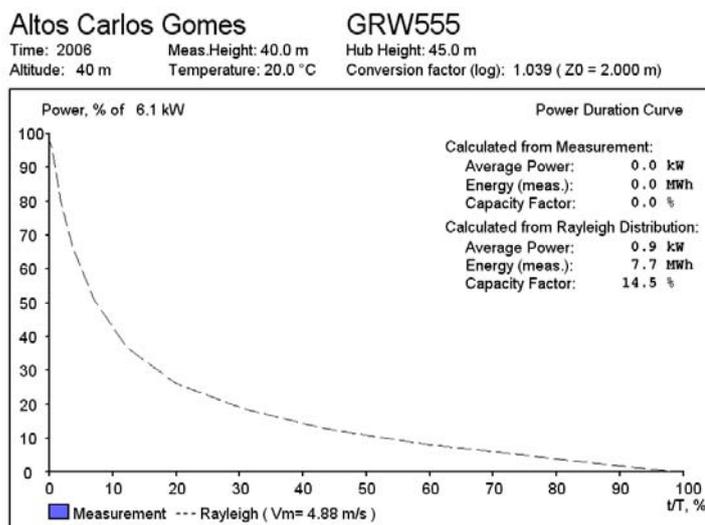


Figura 6.1 – Estimativa energia gerada turbina VERNE555 para $V_m=4,88\text{m/s}$

Um novo fluxo de caixa foi elaborado com os novos dados de energia prevista gerada e fator de capacidade obtido. O resultado foi um aumento significativo no Lucro Líquido do projeto, devido ao aumento do fator de capacidade e da energia gerada, conforme planilha no apêndice. O lucro líquido que após 20 anos era de R\$337,73 passou para R\$1466,59, e o gasto anual total do sistema elétrico passou de R\$2776,84 para R\$1647,98.

7. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de viabilidade técnica demonstrou que utilizando as turbinas citadas, num local com velocidade média de vento inferior a 4 m/s, é inviável a instalação devido ao baixo fator de capacidade resultante. No mercado ainda não existem modelos que sejam eficientes em velocidades tão baixas. Conseqüentemente, a análise econômica obteve resultados ruins, inviabilizando economicamente o sistema, pois o mesmo não apresentou um fluxo de caixa positivo após 20 anos.

Porém, estimando um acréscimo de 1m/s na velocidade do vento, os resultados foram mais animadores, alcançando um fator de capacidade que viabilizaria o projeto. O estudo de viabilidade econômica demonstrou a viabilidade do sistema, mas utilizando um gerador de 6 kW, ainda não seria suficiente para atender a demanda do prédio. Levando-se em conta que na utilização integrado ao prédio, não é recomendado a instalação de turbinas mais potentes, pois poderia comprometer a estrutura do mesmo.

O resultado do estudo econômico demonstrou que após o pagamento do empréstimo, o fluxo de caixa viabilizaria um desconto de aproximadamente 75% do valor gasto com energia pelos sistemas auxiliares do edifício.

No futuro poderia ser feito um estudo mais detalhado da influência da geometria do prédio na velocidade e direção do vento, pois este estudo já demonstrou que o ganho em rendimento do sistema pelo acréscimo da velocidade do vento, pode determinar a viabilidade do mesmo.

8. REFERÊNCIAS

AMMONIT GESELLSCHAFT FÜR MESSTECHNIKMBH (AMMONIT). Disponível em: <http://www.ammonit.de/download/alwin_e.exe>. Acesso em: Novembro de 2009

ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre, 2002. CD-ROM

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Lei do PROINFA**. 2002. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=40>. Acesso em: Novembro de 2009.

DR. CAMPBELL, “**Wind Energy For The Built Environment (Project Web)**”, 2001.

CHINA BEST PRODUCTS, Disponível em: <<http://www.chinabestproducts.com/generator/generator.htm>>. Acesso em: Abril de 2010.

CUSTÓDIO, R. S., **Parâmetros de Projeto de Fazendas Eólicas e Aplicação Específica no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – PUCRS - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

DEWI – Instituto Alemão de Energia Eólica. **Energia Eólica**. Wilhelmshaven, Germany. 1998.

ENERSUD, Disponível em: <<http://www.enersud.com.br/produtos.asp>>. Acesso em: Abril de 2010.

JOHN WILEY & SONS, “**Wind Energy: handbook**”, 617 p 2001

MATTUELLA, J. M. L., “**Fontes Energéticas Sustentáveis: um estudo sobre a viabilidade do aproveitamento da energia eólica em três localidades no RS, 2005**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

OVERMOOR, “**Energy for Sustainable Development Limited Ref: P00702, “Bradford West City Tower Blocks Wind Energy Feasibility Study**”, Bradford, 2003.

PETRY, A.P.; MATTUELLA, J.M.L., “**Análise do Potencial Eólico e Estimativa da Geração de Energia Empregando o “Software” Livre Alwin**”, Porto Alegre, 2007.

SMEATON ROAD, “**Ealing Urban Wind Study**”, Bristol BS1 6XN; Registered charity no.298740, Final Version, Centre for Sustainable Energy, The CREATE Centre, 21 July 2003.

URBAN GREEN ENERGY, Disponível em: <<http://www.urbangreenenergy.com>>. Acesso em: Abril de 2010.

WENZEL, G.M. ;LOPEZ H. F.; VILLAR, J.A.A., “**Estudo da Implementação de Sistema Eólico em Prédio da Empresa Auxiliadora Predial**”, Recife, 2006.

9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

FREITAS FILHO, D. G. R. “**Análise de viabilidade técnica e econômica de uma fazenda eólica no RS**”. 2008. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MAIDANA, C. F.; DALL’ONDER, D. “**Projeto básico de implantação de aerogerador de baixa potência na unidade SEST/SENAT de Bento Gonçalves**”. 19f. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Estimativa de energia gerada por cada turbina, utilizando o programa Alwin.

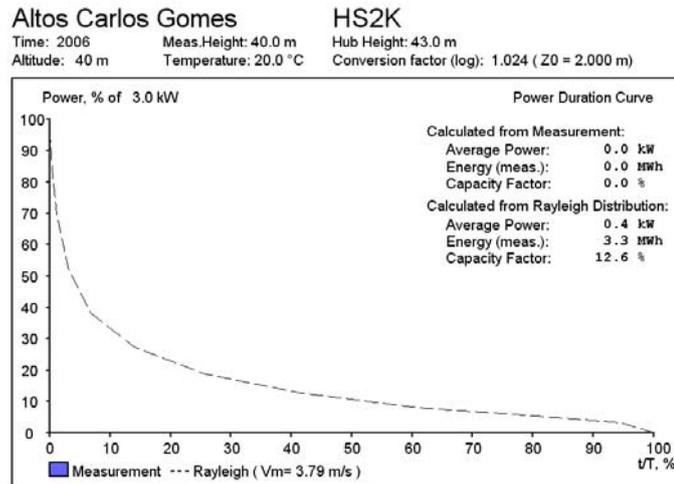


Figura A.1 – Previsão energia gerada e fator de capacidade da turbina HSK2

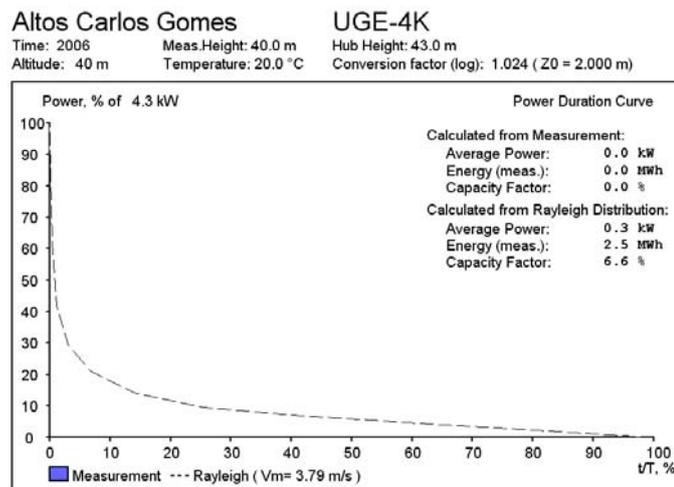


Figura A.2 – Previsão energia gerada e fator de capacidade da turbina UGE-4K

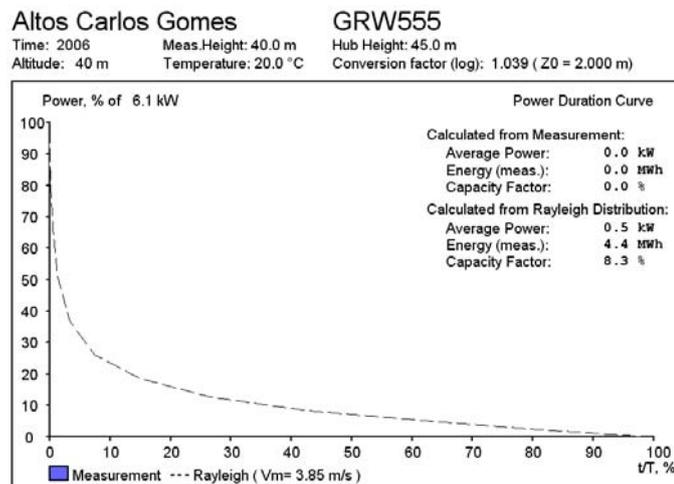


Figura A.3 – Previsão energia gerada e fator de capacidade da turbina GRW555

APÊNDICE B – Fluxo de caixa utilizando a turbina GRW555, considerando a ampliação da viabilidade.

Energia de Referência	7,022936	MWh		Investimento			
Fator De capacidade	0,145			Total	52.250,00		
Potencia da Máquina	0,006	MW		Valor unitario	29500,00	R\$/kWn	
Numero de Máquinas	1			Capital próprio	10.450,00		
Periodo do Contrato	20	anos		Emprestimo	41.800,00	80%	
Coeficiente de Disponibilidade	97%	%		Taxa de juros	4%		
Coeficiente de Rendimento	95%	%		Periodo emprestimo	14	anos	
Valor de comercialização	439	R\$/MWh		Instalação	14750,00		
				Equipamentos	8000,00		
Demonstrativo Resultado Exercicio			ano1	ano2	ano7	ano20	
Energia Comercializada			3.021,41	3.021,41	3.021,41	3.021,41	
Creditos de Carbono							
PIS/COFINS							
RECEITA OPERACIONAL			3.021,41	3.021,41	3.021,41	3.021,41	
O&M	56	R\$/kW-ano	0,00	0,00	336,00	336,00	
Perdas	2%		0,00				
Taxa Aneel	0,50%		15,11	15,11	15,11	15,11	
Depreciação outros-20 anos	5%		783,75	783,75	783,75	783,75	
Depreciação aerogeradores	10%		2.625,00	2.902,10	2.902,10		
Arrendamento	1%		30,21	30,21	30,21	30,21	
Recultivação	4	R\$/kW-ano	24,00	24,00	24,00	24,00	
Impostos							
Seguros	1%		365,75	365,75	365,75	365,75	
Custo de Transmissão da Energia	0	R\$/kW-mês	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sub-total			3.843,82	4.120,92	4.456,92	1.554,82	
Lucro operacional			-822,41	-1.099,51	-1.435,51	1.466,59	
Juros			1.672,00	1672	1114,66667		
Lucro Antes IR			-2.494,41	-2.771,51	-2.550,18	1.466,59	
IR			0,00	0,00	0,0	0,0	
CSLL			0,00	0,00	0,00	0,00	
Lucro liquido			-2.494,41	-2.771,51	-2.550,18	1.466,59	
Fluxo de caixa			Ano 01	Ano 02	Ano 07	Ano 20	
Lucro liquido			-2.494,41	-2.771,51	-2.550,18	1.466,59	
Depreciações			783,75	783,75	783,75	783,75	
Depreciação aerogeradores			2.625,00	2.902,10	2.902,10		
Amortização					3483,33333		
Financiamento			41.800,00				
Invest total			52.250,00				
Fluxo de Caixa liquido			-9.535,66	914,34	-2.347,66	2.250,34	
Consumo Energia do Prédio	740	kW-mês					
Lâmpadas 40W	400		100	unidades			
Elevadores	250		4	unidades			
Portões	90		4	unidades			
Consumo Energia do Prédio	324,86	R\$					
Consumo Energia do Prédio Anual	8,88	MW					
Consumo Energia do Prédio Anual	3898,32	R\$					
Gasto anual total do sistema elétrico			13.433,98	2.983,98	6.245,98	1.647,98	