

DALMEDSON GAÚCHO ROCHA DE FREITAS FILHO

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UMA FAZENDA
EÓLICA NO RS

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
2008



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

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UMA FAZENDA
EÓLICA NO RS**

DALMEDSON GAÚCHO ROCHA DE FREITAS FILHO

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. VOLNEI BORGES
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. PEDRO MELLO
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. PAULO SMITH SCHNEIDER
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2008

de modo especial, à minha família pelo apoio, e à minha namorada Ana Luísa pelo incentivo e ajuda para a 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 trabalho.

ao *Prof. Dr. Edgar Pereira*, por me ensinar parte dos seus conhecimentos e dar a oportunidade de trabalhar com energia eólica.

à minha mãe *Shirley* e meus irmãos *Edson e Cristina*, que sempre apoiaram meus estudos.

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

Este trabalho contou com apoio da seguinte entidade:
- Empresa Pampa Energia Eólica Ltda.

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

Albert Einstein

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.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise de viabilidade técnica e econômica da utilização da energia do vento para a geração de energia elétrica em uma fazenda localizada em Santa Vitória do Palmar no estado do Rio Grande do Sul. Considerando a preocupação crescente com o impacto da geração de energia elétrica, o crescimento do consumo e a relevância do uso de energias renováveis, inicia-se um estudo de viabilidade técnica para a implantação de uma fazenda eólica. Para esta análise, foi considerado o local de implantação, medições do vento, a escolha dos aerogeradores e lay-out. Em seguida, seleciona-se cinco aerogeradores com características semelhantes de diferentes fabricantes e analisa-se a energia gerada em cada situação. Por fim, é apresentado um estudo de viabilidade econômica destes aerogeradores, considerando as diretrizes econômicas do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) do Ministério de Minas e Energia. Neste estudo, apresenta para cada caso, o valor alcançado da Taxa Interna de Retorno (TIR), o qual é o indicador para cálculos de viabilidade econômica.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Renovável, Fazenda Eólica, Aerogeradores, Viabilidade Econômica.

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.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of technical viability and cost of use of the wind energy to generate electricity at a farm located in Santa Vitória do Palmar in the state of Rio Grande do Sul. Considering the growing concern over the impact of the generation of electric power, the growing consumption of cement and the use of renewable energy relevance, will begin a technical viability study for setting up a wind farm. For this analysis, was considered the place of deployment, measurements of wind, the choice of aerogenerators and lay-out. Then select the five aerogenerators with similar characteristics from different manufacturers and analyze the energy generated in each situation. Finally, a study of economic viability of those aerogenerators, considering the guidelines of Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PRO-INFA) of Ministério de Minas e Energia. In this study, presented for each case, the figure reached the Internal Rate of Return (TIR), which is the indicator for economic viability calculations.

KEY-WORDS: Renewable Energy, Wind Farm, Wind Turbine, Economic Viability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1 POTÊNCIA DO VENTO	1
2.2 DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO VENTO	2
3. METODOLOGIA DE PROJETO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA FAZENDA EÓLICA	3
3.1. ESCOLHA DO LOCAL PARA IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO	3
3.2. REALIZAÇÃO DE MEDIÇÕES DE VENTO NO TERRENO ESCOLHIDO E DEFINIÇÃO DO COMPORTAMENTO E CARACTERÍSTICAS DO VENTO NO LOCAL	3
3.3. ESCOLHA DOS AEROGERADORES	4
3.4. DISPOSIÇÃO DOS AEROGERADORES NO TERRENO	4
3.5. PREDIÇÃO DA ENERGIA GERADA NA FAZENDA EÓLICA	5
3.6. ESCOLHA DA CONEXÃO A REDE E DEFINIÇÃO DO PROJETO DE CONEXÃO	5
3.7. DETERMINAÇÃO DOS INVESTIMENTOS NECESSÁRIOS À IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO	6
3.8. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA FINANCEIRA DO PARQUE EÓLICO	6
4. ESTUDO DE CASO DE UM PROJETO DE UMA FAZENDA EÓLICA	6
4.1. ESCOLHA DO LOCAL	6
4.1.1. ÁREA PARA INSTALAÇÃO DOS AEROGERADORES	6
4.1.2. RUGOSIDADE DO LOCAL	7
4.1.3. ACESSO	7
4.1.4. AUTORIZAÇÃO DO PROPRIETÁRIO	7
4.1.5. IMPACTOS AMBIENTAIS	7
4.2. MEDIDAS E ANÁLISE DO VENTO NO LOCAL ESCOLHIDO	7
4.2.1. ESPECIFICAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE VENTO REALIZADAS	8
4.2.2. RESULTADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES	8
4.3. ESCOLHA DOS AEROGERADORES	9
4.3.1 CURVA DE POTÊNCIA DOS AEROGERADORES	9

4.4 ESTIMATIVA DA ENERGIA GERADA	10
4.4.1 ENERGIA PRODUZIDA PELOS AEROGERADORES	10
4.4.2 EFICIÊNCIA DA FAZENDA EÓLICA	10
4.4.3 LAY-OUT DA FAZENDA EÓLICA	11
4.5. CAPACIDADE DA FAZENDA EÓLICA	11
5. ANÁLISE ECONÔMICA	11
6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	13
7. REFERÊNCIAS	14
8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	15
ANEXOS	16

1. INTRODUÇÃO

No final do Século XX, os países desenvolvidos começaram a se preocupar com a necessidade de explorar outras fontes de energia. Isso foi causado por dois principais fatores. Primeiro porque a demanda de energia, especificamente a energia elétrica tem aumentado drasticamente nos últimos 100 anos. Também pela preocupação dos impactos ambientais causados pela geração de energia elétrica. Desta maneira, intensificaram-se as pesquisas e estudos de fontes de energia renovável, limpa e menos poluente, com o objetivo de diversificar a matriz energética considerando um possível esgotamento de recursos fósseis e, consequentemente à energia elétrica. (GASCH; TWELE, 2002).

No Brasil, o sistema elétrico possui 88,5% de sua capacidade de geração de energia é advinda de fonte hidrelétrica, 5,9% de origem térmica convencional e 5,6% oriundos de outras fontes. (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2005). Entretanto, o maior potencial hidrelétrico no Brasil encontra-se na Amazônia que é distante dos grandes centros consumidores, fazendo com que se torne inviável o aproveitamento deste potencial devido ao alto custo financeiro e danos ambientais irreversíveis. (MATTUELLA, 2005).

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).

Assim, a energia eólica encaixa-se perfeitamente ao contexto por se tratar de uma fonte renovável inesgotável com baixos custos ambientais e a não emissão de dióxido de carbono na atmosfera, sendo uma alternativa para a diversificação da matriz energética no país.

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 dos raios solares na superfície terrestre ocasionando uma diferença de temperatura entre as regiões equatorial e polares e consequentemente o movimento do ar (CUSTÓDIO, 2002) e também é causado pelo movimento de rotação da terra. (ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2002)

2.1 POTÊNCIA DO VENTO

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

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

onde:

P – potência do vento;

ρ – massa específica do ar;

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

v – velocidade do vento.

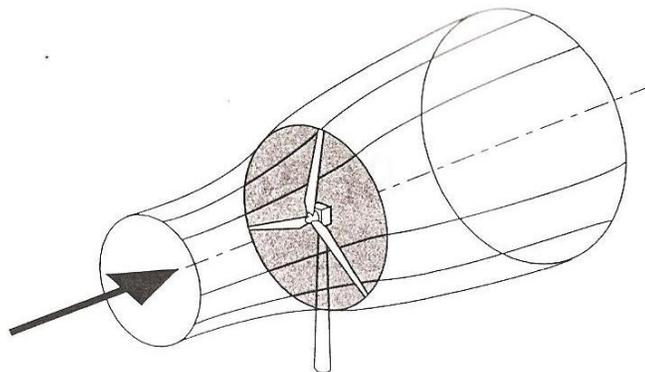


Figura 2.1 – Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal (JOHN WILEY & SONS, 2001)

Uma turbina eólica poderá extrair apenas uma parcela da energia do vento. A fração extraída denomina-se de coeficiente de potência C_p e é definido por:

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

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

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:

$f(v)$ – função de Weibull;

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 calculada 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 . A figura 2.2 mostra a influência do parâmetro k na curva de distribuição de Weibull.

- $k = 1,0$: distribuição exponencial;
- $k = 2,0$: distribuição de Rayleigh;
- $k = 3,5$: distribuição normal.

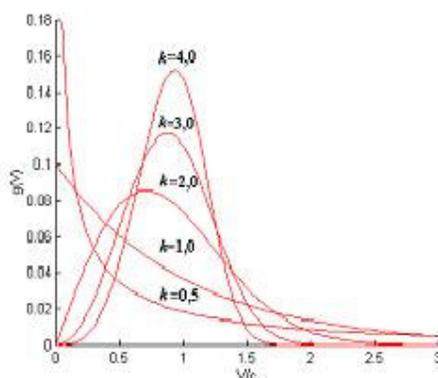


Figura 2.2 - Influência do parâmetro k na curva distribuição de Weibull.

3. METODOLOGIA DE PROJETO PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA FAZENDA EÓLICA

Para o desenvolvimento e implantação de uma fazenda eólica, devem ser considerados os seguintes parâmetros:

3.1. ESCOLHA DO LOCAL PARA IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO

Para a instalação do parque eólico deve-se observar alguns fatores importantes, os quais devem ser atendidos de forma satisfatória para que o projeto seja viável.

A área escolhida deve possuir dimensões compatíveis com a potência do parque eólico pretendido e uma eficiente disposição das turbinas, o local deve possuir uma baixa rugosidade superficial, bem como livre de obstáculos, ou até mesmo ao redor, para que a velocidade no rotor seja a maior possível; fácil acesso ao local para futuras visitas manutenções e/ou coletas de dados também como uma proximidade com linhas de transmissão/distribuição para que a conexão no sistema elétrico seja viável.

Devem também ser considerados se não há restrições ambientais, também a autorização do proprietário do local e órgãos públicos, para a instalação de um futuro parque eólico.

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

Na área escolhida deve-se fazer uma campanha de medição dos ventos no local escolhido durante 12 meses, no mínimo. Feitas as medições, com os dados colhidos devem ser analisados estatisticamente para se determinar o perfil do comportamento do vento no local. Os

dados coletados são apresentados em um gráfico com os histogramas das frequências de velocidade do vento.

3.3. ESCOLHA DOS AEROGERADORES

Nesta fase, 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.

3.4. DISPOSIÇÃO DOS AEROGERADORES NO TERRENO

A determinação da disposição dos aerogeradores requer levantamentos detalhados da rugosidade e topografia do terreno e o cálculo do campo de velocidades e a interferência aerodinâmica entre todos os rotores (ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2002) com o objetivo de se ter a máxima eficiência da fazenda eólica.

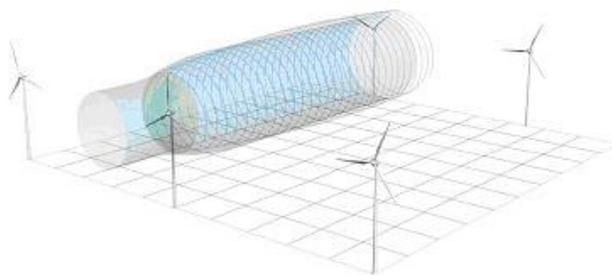


Fig 3.1 - Esteira de Vórtices e afastamento das turbinas (ATLAS EÓLICO RS, 2002).

Segundo os estudos realizados pelo Instituto Alemão de Energia Eólica (DEWI), pode-se observar que a eficiência da fazenda eólica é função da distância entre os aerogeradores instalados. Na região atrás da turbina se forma uma esteira de vórtices, a qual possui um menor potencial, uma menor velocidade média do vento e conseqüentemente um menor desempenho (CUSTÓDIO,2002).

Na figura 3.2 pode-se observar a relação de eficiência de uma fazenda eólica em função da disposição dos aerogeradores, de acordo com estudos realizados pelo instituto DEWI.

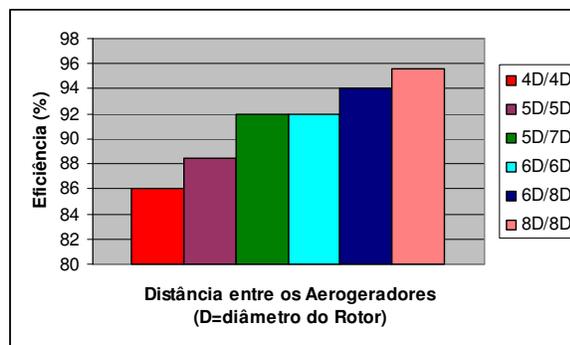


Figura 3.2 - Eficiência de uma fazenda eólica em função da disposição dos aerogeradores

Segundo Custódio (2002), ainda existem outros aspectos a serem considerados para definir a disposição dos aerogeradores. Estes aspectos devem-se considerar a emissão de ruídos; aspectos ambientais; proteção das aves, efeitos da sombra da pá.

3.5. PREDIÇÃO DA ENERGIA GERADA NA FAZENDA EÓLICA

Definido o aerogerador e a disposição deles, faz-se uma estimativa de produção da usina, tendo-se em conta a sua eficiência. Dependendo dos resultados obtidos faz-se uma otimização do projeto com o objetivo de melhorar o desempenho da fazenda eólica.

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).

$$F_C = \frac{E_{prevista}}{E_{nom}} \quad (3.1)$$

Onde:

F_C – Fator de capacidade;
 $E_{prevista}$ – Energia prevista;
 E_{nom} – Energia nominal.

A Capacidade da fazenda eólica considera-se a Energia de Referência ER . Ela é a energia em MWh produzida pela central geradora durante o período de um ano. (MATTUELLA, 2005). A energia de referencia pode ser calculada por:

$$ER = nPFc\Delta t\eta\xi \quad (3.2)$$

Onde:

ER - Energia de referência;
 n – número de máquinas;
 P – Potência nominal da máquina;
 Δt – Período de tempo;
 η – Eficiência da fazenda eólica;
 ξ – Fator de disponibilidade.

Segundo Molly¹ (2004 apud MATTUELLA, 2005), O fator de disponibilidade ξ é a indisponibilidade técnica para manutenções. A eficiência de uma fazenda eólica η , é devido ao efeito da sombra dos aerogeradores em uma fazenda eólica (CUSTÓDIO, 2002).

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

Deve ser escolhido 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.

¹ Em entrevista com Jeans Peter MOLLY, durante estágio no DEWI INSTITUT, em janeiro de 2004, foi discutida a real eficiência de fazendas eólicas, tendo sido informada que as perdas são na ordem de 3% para indisponibilidade técnica (97%).

3.7. DETERMINAÇÃO DOS INVESTIMENTOS NECESSÁRIOS À IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO

Para se determinar os investimentos necessários para implantação da fazenda eólica, devem ser considerados os custos como: aerogeradores, conexões, transformadores, acessos, terraplanagens, montagem, comissões, impostos e demais custos.

3.8. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA FINANCEIRA DO PARQUE EÓLICO

Para o estudo de viabilidade econômica, devem ser consideradas as seguintes premissas: investimento, custos de operação, manutenção, impostos, taxas e juros.

O parâmetro para se mensurar a viabilidade econômica é, geralmente, dada pela TIR – Taxa Interna de Retorno. De acordo com Mattuella (2005), a TIR é a taxa de diferimento no tempo que torna equivalente a receita do projeto ao longo do prazo de execução.

4. ESTUDO DE CASO DE UM PROJETO DE UMA FAZENDA EÓLICA

4.1. ESCOLHA DO LOCAL

Para a escolha da região, considera-se a evidência do potencial eólico, acesso, proximidade de linhas de transmissão e a ausência de barreiras que podem inviabilizar o projeto.

A área selecionada se caracteriza por ser uma extensa área da planície costeira, coberta de restinga baixa, dunas e atividades agrícolas de baixa rugosidade predominando a cultura de arroz e pastagens. Possui grandes extensões com ventos com velocidade média anual consideráveis, reunindo ótimas condições para implantação de usinas eólicas de grande porte. (ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2002)

4.1.1. ÁREA PARA INSTALAÇÃO DOS AEROGERADORES

A figura 4.1 mostra a área localizada no município de Santa Vitória do Palmar, na região sul do Rio Grande do Sul a uma distância de aproximadamente de 500 km de Porto Alegre. A área de 363 hectares As coordenadas do ponto médio geográfico são as seguintes:

Latitude: 33°32'31,34" S.

Longitude: 53°18'48,91" W.

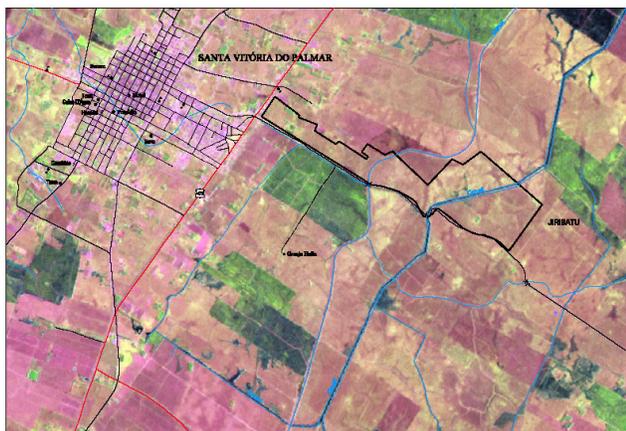


Figura 4.1 - Imagem de satélite da fazenda

4.1.2. RUGOSIDADE DO LOCAL

A superfície da região é caracterizada por campos nativos, onde abriga uma grande variedade de animais e eucaliptos esparsos.

Segundo Custódio (2002) a velocidade do vento próximo ao solo é influenciada pela rugosidade e/ou obstáculos nela inseridos. De acordo com Toen e Pettensen² (1989 apud CUSTÓDIO, 2002), o local pode ser classificado, quanto a rugosidade, como classe 1, onde o elemento de rugosidade z_0 é 0,03 m.

4.1.3. ACESSO

O acesso à fazenda a qual se planeja implantar a fazenda eólica é feito por rodovia Federal com pavimentação, BR-471 km 620, Quinta-Santa Vitória do Palmar.

4.1.4. AUTORIZAÇÃO DO PROPRIETÁRIO

O proprietário da área deve estar ciente e de acordo com a implantação de uma fazenda eólica no local. A autorização é formalizada através de um contrato de arrendamento entre os proprietários da área e a empresa a qual é responsável pelo projeto.

4.1.5. IMPACTOS AMBIENTAIS

Segundo o Relatório Ambiental Simplificado do Complexo Eólico de Santa Vitória do Palmar (2008), o principal impacto sobre a flora se dá pela remoção de espécies vegetais durante a movimentação da terra, para a estruturação do canteiro de obras, construção de estradas, pátio de manobras e fundação dos aerogeradores. A tendência é que a vegetação nativa afetada durante a implantação, ao longo do período de operação, se recupere, não havendo grandes impactos.

Durante a fase de implantação serão afetadas todas as espécies da fauna existentes no local que são causados pelos seguintes fatores: perda de habitat e perturbação de hábitos, atropelamento da fauna e destruição de ninhos no solo. Pode-se considerar que o impacto de baixa magnitude de caráter provisório.

Durante a operação da fazenda eólica existe a possibilidade de perturbação nas rotas de migração de aves e quirópteros, aumento do risco de atropelamento da fauna nas vias de acesso e estradas internas, colisão de aves e quirópteros com os aerogeradores; colisão e eletrocussão com as linhas de transmissão. Estima-se que o impacto seja de média magnitude, que ocorrerá de forma permanente no local.

4.2. MEDIDAS E ANÁLISE DO VENTO NO LOCAL ESCOLHIDO

As medições de vento foram realizadas no período compreendido entre o dia 17 de outubro de 2006 e 09 de abril de 2008. Os dados dos ventos foram gentilmente cedidos pela empresa Pampa Energia Eólica Ltda para execução este trabalho.

² TROEN, I.; PETERSEN. E. L., **European Wind Atlas**. Riso Nacional Laboratory. Roskilde, Riso Publication, Dinamarca, 1989.

4.2.1. ESPECIFICAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE VENTO REALIZADAS

A torre de medição está localizada próxima da área em questão no município de Santa Vitória do Palmar. As especificações das medições de vento podem-se ver abaixo:

Latitude: 33°35'10,39" S.
 Longitude: 53°16'27,07" W.
 Altura da torre: 100 m.
 Marca Armazenador de dados: Ammonit.
 Modelo Armazenador de Dados: Meteo-32.
 Intervalo de medições: 1 min.
 Início das Medições: 17/10/2006.
 Fim das Medições: 09/04/2008.

Na figura 4.2 está indicada a localização da torre de medições de vento em estudo.



Figura 4.2 - Imagem de satélite da localização do anemômetro instalado

4.2.2. RESULTADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES

Os dados foram obtidos através do *software* livre ALWIN, o qual é um programa de análise estatística específico para dados anemométricos, desenvolvido pela empresa Ammonit e o Instituto Alemão de Energia Eólica (DEWI).

O tratamento estatístico das medições é apresentado na Figura 4.3. Nela apresenta o histograma da distribuição do vento e as funções de Weibull e Rayleigh obtidos através das distribuições da velocidade do vento. O histograma é obtido através da tabulação dos dados do vento na forma de frequência de distribuição que pode ser observado no Anexo E.

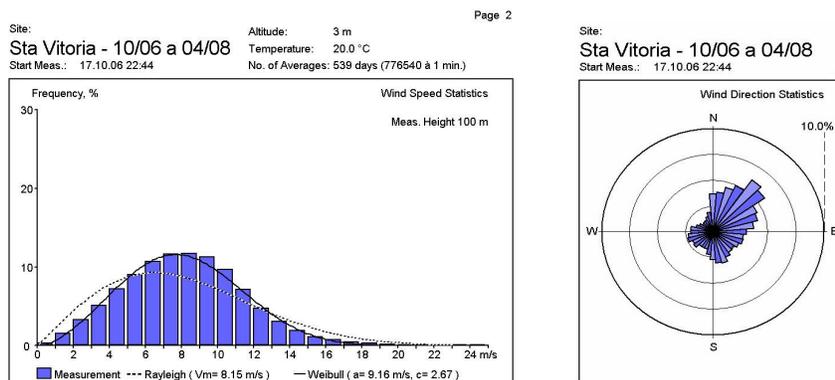


Figura 4.3 - Histograma e Rosa dos Ventos em Santa Vitória do Palmar retirada do *software* livre ALWIN

Através do *software* livre ALWIN, foi encontrado o valor de 2,67 para o Fator de Weibull “k”, e 9,16 m/s para o parâmetro de escala “c”. A direção predominante dos ventos é Nordeste, a qual será indicada para o posicionamento dos aerogeradores.

4.3. ESCOLHA DOS AEROGERADORES

Na Fazenda Eólica foram selecionados os seguintes modelos de turbinas eólicas para serem avaliados, como pode ser observado na figura 4.4.

- AVANTIS AV 908 2.5 MW
- ENERCON E70 2.3 MW
- ENERCON E82 2.0 MW
- GE 2.5 MW
- VESTAS V90 2.0 MW



Figura 4.4 – Aerogeradores escolhidos

4.3.1 CURVA DE POTÊNCIA DOS AEROGERADORES

O perfil aerodinâmico das turbinas eólicas com velocidade variável é baseado em uma relação entre a velocidade da ponta de pá e a velocidade do vento. Com isso o rotor altera a sua rotação de acordo com a velocidade do vento. Normalmente é combinado com o sistema de controle de passo, caracteriza-se pela rotação longitudinal das pás do rotor em situações de velocidade dos ventos maiores que a nominal do aerogerador, reduzindo o ângulo de ataque do fluxo de ar, permitindo uma faixa de trabalho com diferentes condições de operações. A figura abaixo mostra a curva de potência dos aerogeradores utilizados, os quais possuem este tipo de controle (CUSTÓDIO, 2002).

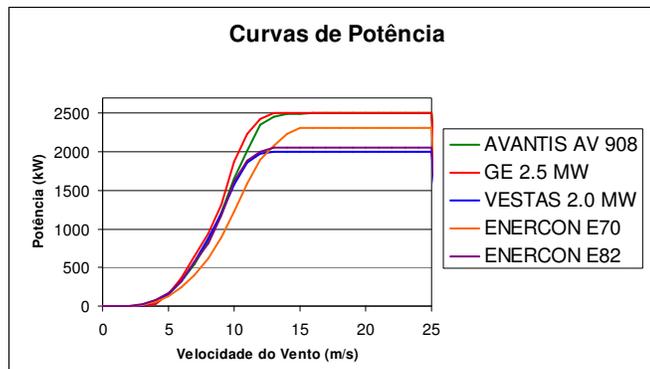


Figura 4.5 - Curva de Potência dos Aeroogeradores

4.4 ESTIMATIVA DA ENERGIA GERADA

Através do *software* livre ALWIN, é possível obter o fator de capacidade do aerogerador adotado na fazenda eólica. 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.

4.4.1 ENERGIA PRODUZIDA PELOS AEROGERADORES

A tabela 4.1 apresenta a energia anual gerada por cada aerogerador e o fator de capacidade de cada aerogerador durante o período de um ano.

Tabela 4.1 - Energia Anual Gerada por cada Aeroerador

Fabricante	Modelo	Potência (kW)	Fator de Capacidade (%)	Diâmetro Rotor (m)	Altura Cubo (m)	Energia Anual Gerada (MWh)
Avantis	AV 908	2500	41,0	90	100	8979,0
Enercon	E 70	2300	35,2	71	100	7092,1
Enercon	E 82	2000	46,2	82	100	8094,2
GE	2.5MW	2500	44,3	100	100	9701,7
Vestas	V90	2000	47,1	90	100	8251,9

Os dados da tabela 4.1 se referem apenas à energia gerada anualmente por cada aerogerador. Para a fazenda eólica em questão, a Energia Anual Gerada pela fazenda eólica se dá pelo produto do número de aerogeradores pela Energia Anual Gerada por cada aerogerador e um fator de perdas. Os dados obtidos estão apresentados no Anexo D.

4.4.2 EFICIÊNCIA DA FAZENDA EÓLICA

Conforme foi discutido anteriormente, a alternativa de se determinar a eficiência de uma fazenda eólica, será utilizada a metodologia simplificada, sugerida por Custódio³ (2002 apud DEWI, 2001).

Assim, com a relação $5D/7D$ representa a distância lateral e em profundidade respectivamente, onde D representa o diâmetro das pás dos aerogeradores em questão, a fazenda eólica em estudo terá uma **eficiência de 92%**. Após a definir a distância entre os aerogeradores, faz-se a configuração do Lay-out da fazenda Eólica.

³ DEWI – German Wind Energy Institute. **Wind Energy Seminar**. Rio de Janeiro. August, 2001.

4.4.3 LAY-OUT DA FAZENDA EÓLICA

Para a configuração do Lay-out da fazenda eólica, os aerogeradores devem estar alinhados perpendicularmente à direção dos ventos predominantes espaçados conforme estudos realizados pelo Instituto DEWI.

Utilizando a sugestão do DEWI, haverá mais de uma configuração do Lay-out da fazenda eólica, dependendo do aerogerador selecionado. Como foi visto anteriormente, a distância dos aerogeradores é função do diâmetro das pás dele. Na tabela 4.2, utilizando a relação 5D/7D, o espaçamento entre os aerogeradores são apresentados.

Tabela 4.2 - Espaçamento entre os Aerogeradores

Fabricante	Modelo	Diâmetro Rotor (m)	Distância Lateral (m)	Distância Frontal (m)
Avantis	AV 908	90	450	630
Enercon	E 70	71	355	497
Enercon	E 82	82	410	574
GE	2.5MW	100	500	700
Vestas	V90	90	450	630

O Lay-out para cada aerogerador selecionado poderá ser visto no anexo A deste trabalho.

4.5. CAPACIDADE DA FAZENDA EÓLICA

A capacidade da fazenda eólica pode ser representada pela Energia de Referência *ER* é a energia em MWh produzida pela central geradora durante o período de um ano. (MATTUELLA, 2005). Utilizando a equação 3.2, os valores da *ER* para cada aerogerador selecionado encontram-se na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Energia Anual Gerada pela fazenda eólica

Fabricante	Modelo	Potência (kW)	Nº de Máquinas	Potência Instalada (kW)	Fator de Capacidade (%)	ER (MWh)
Avantis	AV908	2500	12	30000	41,0	96154,3
Enercon	E 70	2300	13	29900	35,2	82276,8
Enercon	E 82	2000	12	24000	46,2	86679,6
GE	2.5MW	2500	10	25000	44,3	86578,0
Vestas	V90	2000	12	24000	47,1	88368,2

Os resultados obtidos na tabela acima, 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 desenvolvida por Mattuella (2005) acrescentando a taxa de inflação. Nesta planilha foram consideradas as exigências do PROINFA para a viabilização de projetos voltados à energia eólica. Para a viabilização, exige uma taxa interno de retorno (TIR) de 15%. Este indicador é utilizado porque torna equivalente a receita do projeto ao longo da sua execução ao valor inicial do empreendimento.

Para se obter a TIR, utilizou-se a hipótese de compra das máquinas atrelando o preço de compra por quilowatt. Segundo Relatório Consolidado Final por PSR (2008), os preços alcançados no Brasil para empreendimentos, o custo por quilowatt instalado é de R\$ 4.500,00/kW. Outros parâmetros importantes para análise econômica são a energia de referência e o preço de venda da energia contratada pelo PROINFA. Segundo o relatório da PSR (2008), o preço médio de venda real da opção eólica é de R\$ 200,00/MWh.

Na viabilidade econômica, para o desenvolvimento do fluxo de caixa, foram adotados as seguintes premissas:

- a) Período de autorização de operação da ANEEL e vigência do contrato: 20 anos.
- b) Potência unitária: equipamentos de 2 MW para Vestas V90 e Enercon E82, 2.3MW para Enercon E70, 2.5 MW para Avantis e GE.
- c) Potência total do parque: 24 MW para Vestas V90 e Enercon E82, 25 MW para GE, 29 MW para Enercon E70 e 30MW para Avantis AV908.
- d) Fator de capacidade: 35,2% para Enercon E70, 41% para Avantis AV908, 44,3% para GE, 46,2% para Enercon E82 e 47,1% para Vestas V90.
- e) Fator de disponibilidade: 97% (MOLLY,2006).
- f) Eficiência: 92% (CUSTÓDIO, 2002).
- g) Perdas na transmissão: 1% (MOLLY,2006).
- h) Valor de compra de energia: R\$200,00/MWh (PSR,2008).
- i) Investimento em equipamento e implantação: R\$ 4.500,00/kW (PSR, 2008).
- j) Taxa de juros financiamento BNDES: 9,5% (MATTUELLA, 2005).
- k) Taxa de inflação: 4,5% ao ano (IGP-M/FGV).
- l) Depreciação: 5% (MOLLY, 2006).
- m) Impostos sobre a receita: PIS:1,65%, COFINS:7% (MOLLY,2006).
- n) Imposto de Renda: 25% sobre receita líquida.
- o) Despesa manutenção e operação; entre 1º e 2º ano: R\$50,00/kW instalado; entre o 3º e o 10º ano: R\$100,00/kW instalado; entre o 11º e o 20º ano: R\$120,00/kW instalado (YAZBECK, 2004).
- p) Custo do Seguro operacional: 0,5% do custo total da instalação, anualmente (YAZBECK,2004).
- q) Custo de arrendamento: 1,8% do faturamento anual;
- r) Custo de Transmissão de energia: R\$1,25/kW/mês, para projetos com menos de 30MW (YAZBECK,2004).
- s) Custo de recultivação: R\$3,50/kW/ano é uma reserva financeira destinada à desmontagem e reconstrução da área do parque eólico ao final do 20º ano.
- t) Crédito de Carbono: R\$12,50/MWh (PSR, 2008).

Com estes parâmetros, constrói-se o fluxo de caixa para cada aerogerador obtendo a respectiva TIR. Na tabela 5.1 são apresentados os valores para TIR para os aerogerador selecionados no empreendimento. Conforme Mattuella (2005), foi considerado como valor inicial do empreendimento 30% do valor desembolsado pelo empreendedor e o prazo de 20 anos de execução do projeto. A planilha utilizada para o cálculo da TIR, utilizando o aerogerador ENERCON E82 pode ser observada no Anexo C.

Tabela 5.1 - Valores da Taxa Interna de Retorno - TIR

Fabricante	Modelo	Potência (kW)	Potência Instalada (kW)	Fator de Capacidade (%)	TIR (%)	TIR ⁴ (%)
Avantis	AV908	2500	30000	41,0	15	17
Enercon	E 70	2300	29900	35,2	11	12
Enercon	E 82	2000	24000	46,2	20	22
GE	2.5MW	2500	25000	44,3	18	19
Vestas	V90	2000	24000	47,1	20	22

A partir dos resultados obtidos, observa-se na tabela 5.1, que o aerogerador produzido pela Enercon E70 não obteve um valor para taxa interna de retorno superior aos 15% exigidos pelo PROINFA. Os demais aerogeradores obtiveram resultados satisfatórios, isto é, apresentaram uma TIR maior que 15%.

6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da viabilidade técnica e econômica de uma fazenda eólica em Santa Vitória do Palmar foi apresentada. Por meio dos histogramas obtidos, observou-se uma distribuição uniforme da velocidade dos ventos, o que demonstra um excelente potencial eólico na localidade.

Com relação à análise de viabilidade técnica, pode-se concluir que os aerogeradores possuem excelentes fatores de capacidade em comparação com o parque eólico de Osório-RS que apresenta um fator de capacidade aproximado de 32% (VENTOS DO SUL, 2008). Os aerogeradores selecionados neste trabalho evidenciam um desempenho próximo ou superior a este nível.

Quanto à análise de viabilidade econômica, frise-se que foram respeitados as diretrizes econômicas estipuladas pelo PROINFA. A energia eólica é uma energia limpa e renovável, portanto o projeto pode receber o benefício do crédito de carbono, o que contribui para viabilizar economicamente o projeto. Nela foi observado que a taxa interna de retorno (TIR), que é o principal indicador para análise de viabilidade econômica, está diretamente relacionada com o fator de capacidade. Dentre os aerogeradores selecionados, apenas o Enercon E70 não atingiu os 15% da taxa interna de retorno estipulados pelo PROINFA.

Existem ainda estudos que utilizam a dinâmica dos fluidos computacional CFX, com o objetivo de alcançar um melhor posicionamento dos aerogeradores, o que minimiza o efeito da sombra dos aerogeradores, melhora a eficiência da fazenda eólica e conseqüentemente obtém melhores índices econômicos.

É de se observar ainda que, entre outras exigências, o PROINFA estabelece o índice de nacionalização. Ou seja, o programa exige que 90% dos componentes e máquinas utilizadas no projeto sejam fabricados no Brasil. Embora os aerogeradores Avantis, GE e Vestas apresentem um bom desempenho, só podem ser utilizados se os seus fabricantes estabelecerem plantas de nacionalização dos seus produtos. Desta forma o aerogerador Enercon E82 atende os requisitos técnicos e econômicos para a sua utilização.

De uma forma geral, conclui-se que, devido ao alto potencial eólico, o projeto de um parque eólico na região de Santa Vitória do Palmar é efetivamente viável tanto técnica como economicamente.

⁴ Considerando Créditos de Carbono

7. REFERÊNCIAS

AMMONIT GESELLSCHAFT FÜR MESSTECHNIKMBH (AMMONIT). Disponível em: <http://www.ammonit.de/download/alwin_e.exe>. Acesso 14 de agosto de 2008

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

AVANTIS Disponível em: <<http://www.avantis-energy.com/index2.html>>. Acesso em: 25 ago. 2008.

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 16 de agosto de 2008.

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.

ENERCON Disponível em: <http://www.enercon.de/en/_home.htm>. Acesso em: 25 ago. 2008.

GASCH, R.; TWELE, J., **“Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation”**. Berlin: Solarpraxis AG, 2002.

GE ENERGY Disponível em: < http://www.ge-energy.com/businesses/ge_wind_energy/en/index.htm >. Acesso em: 25 ago. 2008.

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.

MOLLY. Jeans Peter., **“Centrais Eólicas: Técnicas, Planejamento, Financiamento, Verificação”**, Porto Alegre, 2006.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Disponível em <www.ons.org.br/home>. Acesso em agosto de 2008.

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.

PSR. **Energia Eólica: Proposta de tratamento metodológico Análise da competitividade econômica Relatório Final Consolidado**. Rio de Janeiro, 2008. 19 p.

VENTOS DO SUL (Brasil) (Org.). **O Projeto: Dados Técnicos**. Disponível em: <<http://www.ventosdosulenergia.com.br/highres.php>>. Acesso em: 02 nov. 2008.

VERACE. **Relatório Ambiental Simplificado do Complexo Eólico de Santa Vitória do Palmar**. Porto Alegre, 2008. CD-ROM.

VESTAS Disponível em: <<http://www.vestas.com/en/wind-power-solutions/wind-turbines/2.0-mw.aspx>>. Acesso em: 25 ago. 2008.

YASBECK Paulo Gustavo. **Projetos de Energia Eólica**. [10 nov. 2004]. Entrevistadora: Jusara Mattuela. 2004. Entrevista concedida pelo Gerente Delegado de Projetos de Geração de Energia Eólica Innovent Ltda.

8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

LUDWIG, D. E. “**Assessment of the influence of a wind turbine in the wind flow using the computational fluid dynamic**”. 2007. 26f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PICCOLI, G. L. “**Análise da Viabilidade de uma Fazenda Eólica Empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional**”. 2006. 28f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ANEXOS

ANEXO A – LAY-OUT DA FAZENDA EÓLICA PARA CADA AEROGERADOR

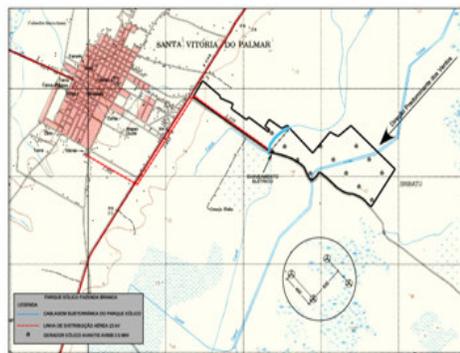


Fig A.1 Lay-out AVANTIS AV908 2.5 MW

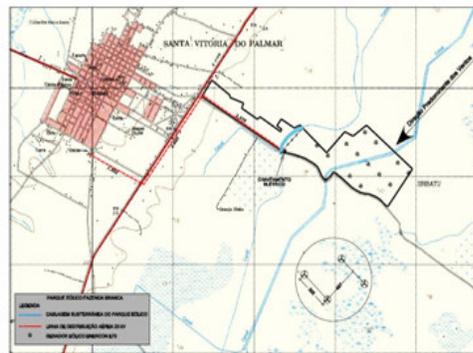


Fig A.2 Lay-out ENERCON E70 2.3 MW

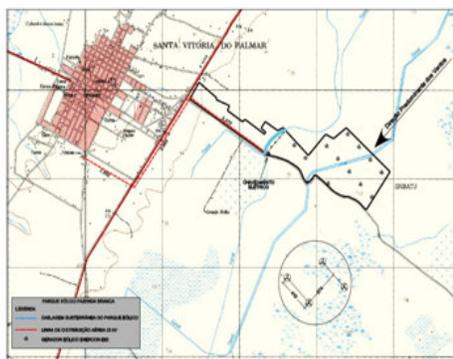


Fig A.3 Lay-out ENERCON E82 2.0 MW

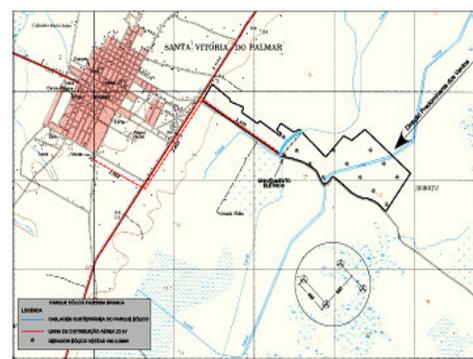


Fig A.4 Lay-out GE 2.5 MW

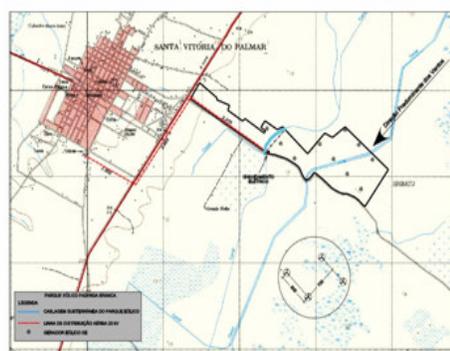


Fig A.5 Lay-out VESTAS V90 2.0 MW

ANEXO B – CÁLCULO DA TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)

$$FC_0 - \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} = 0 \quad (\text{A.1})$$

Onde:

FC_0 – investimento inicial

FC_j – receita;

j – períodos;

i – taxa interna de retorno (TIR).

ANEXO C – FLUXO DE CAIXA COM O AEROGERADOR ENERCON E82

O fluxo de caixa está representado na tabela C.1.

Tabela C.1 Fluxo de Caixa com Aerogerador Enercon E82

Fluxo de Caixa de uma fazenda eólica utilizando o Aerogerador ENERCON E82 em Santa Vitória do Palmar-RS

	Valor Unit.	Unidade	1ºano	2ºano	20ano
Receita Bruta		RS	17.335.919,46	22.575.876,64	40.008.880,48
Energia de Referência-ER	86.679,6	MWh			
Preço de Compra da Energia	RS 200,00	RS/MWh			
Potência do Parque	24000	kW			
Invest eq e planta	RS 4.500,00	RS/kW			
Financiamento Projeto-BNDES		70%			
Taxa de Inflação		4,5%			
Eficiência da Fazenda Eólica		92%			
Fator de Disponibilidade		97%			
Fator de Capacidade		46,2%			
Número de Aerogeradores	12				
Potência do Aerogerador	2000	kW			
Crédito de Carbono	12,50	RS/MWh	RS 1.083.494,97	RS 1.083.494,97	RS 1.083.494,97
(i) Perdas na Transmissão		1%	RS 173.359,19	RS 225.758,77	RS 400.088,80
(j) Impostos sobre a Receita					
PIIS		1,65%	RS 286.042,67	RS 372.501,96	RS 298.914,59
COFINS		7%	RS 1.213.514,36	RS 1.580.311,37	RS 2.800.621,63
(k) Custos / Despesas Operacionais.....					
Operação e Manutenção 1 - 2 anos	RS 50,00	RS /kW	RS 1.200.000,00		
Operação e Manutenção 3 - 10 anos	RS 100,00	RS/kW		RS 2.400.000,00	
Operação e Manutenção 11 - 20 anos	RS 120,00	RS/kW			RS 2.880.000,00
Custo de arrendamento		1,8%	RS 312.046,55	RS 406.365,78	RS 720.159,85
Custo do Seguro Operacional		0,5%	RS 86.679,60	RS 112.879,38	RS 200.044,40
Custo na Transmissão da Energia	RS 2,50	RS/kW/mês	RS 720.000,00	RS 720.000,00	RS 720.000,00
Custo de reativação	RS 3,50	RS/kW/ano	RS 84.000,00	RS 84.000,00	RS 84.000,00
Depreciação		5,0%	RS 540.000,00	RS 540.000,00	RS 540.000,00
(l) Financiamento BNDES					
Juros a.a.		9,5%	RS 7.182.000,00	RS 7.182.000,00	RS 7.182.000,00
Amortização do financiamento					
(m) Imposto de Renda.....		25%	RS 1.384.569,27	RS 2.238.014,85	RS 6.045.762,80
(n) Contribuição Social.....					
Fluxo de Caixa.....					
	Ativos	RS (108.000.000,00)	RS 5.237.202,78	RS 7.797.539,50	RS 19.220.783,37
	Capital Próprio	RS (32.400.000,00)	RS 5.237.202,78	RS 7.797.539,50	RS 19.220.783,37
TIR	22%				

Onde:

RB - receita bruta [R\$];

ER - energia de referência [MWh];

Pot parque – potência nominal instalada [kW];

Inv eq e pl - investimento em equipamento e planta [R\$/kW];

pr compra - preço de compra da energia [R\$/MWh];

nº - número de aerogeradores [adimensional];

p unit - potência unitária [MW];

0,97 - coeficiente de aproveitamento [adimensional];

0,92 - coeficiente de rendimento [adimensional];

nº dias - número de dias do ano [adimensional];

FC - Fator de Capacidade [adimensional];

nº horas - número de horas do dia [adimensional].

Financ BNDES - financiamento do BNDES [R\$];

Juros - Juros de 9% [adimensional];

Inv Inicial - investimento inicial [R\$];

0,7 - financiamento de 70% do projeto [adimensional].

ANEXO D – RESULTADOS PROVENIENTES DO SOFTWARE ALWIN

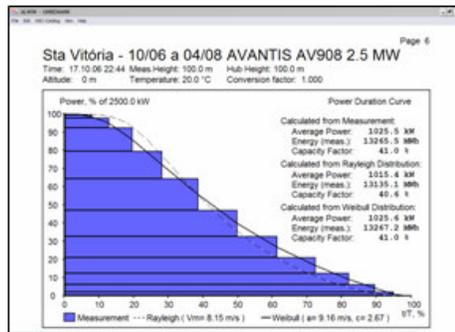


Fig D.1 Fator Capacidade AVANTIS AV908

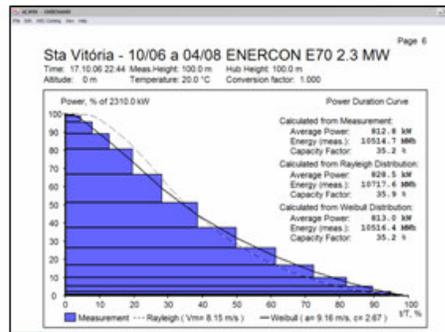


Fig D.2 Fator Capacidade ENERCON E70

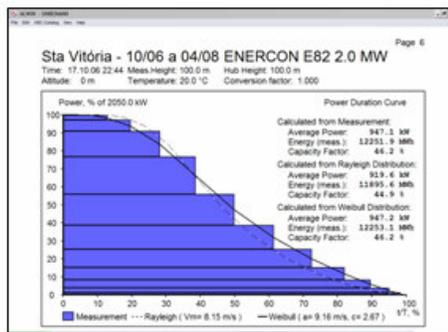


Fig D.3 Fator Capacidade ENERCON E82

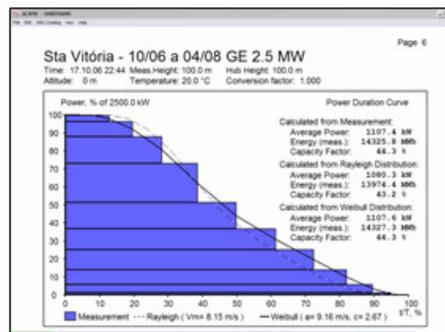


Fig D.4 Fator Capacidade GE 2.5 MW

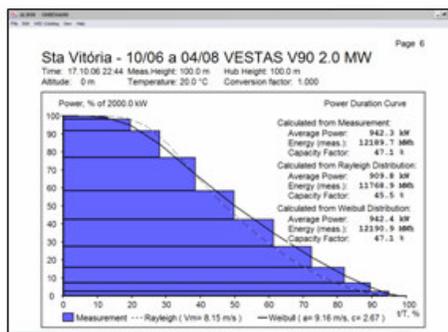


Fig D.5 Fator Capacidade VESTAS V90

ANEXO E – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA VELOCIDADE DO VENTO

Segundo Custódio (2002), o vento possui uma característica aleatória. Assim torna-se necessário a sua discretização dos dados medidos. Na tabela E.1, são apresentados os dados de vento divididos em faixas de 1 m/s.

Tabela E.1 - Tabulação dos dados de vento na forma de frequência de distribuição

Velocidade do Vento (m/s)	Número de ocorrências	Frequência Relativa (%)
0-1	2096	0,27
1-2	11182	1,44
2-3	25237	3,25
3-4	42088	5,42
4-5	59327	7,64
5-6	74547	9,60
6-7	85264	10,98
7-8	89923	11,58
8-9	87826	11,31
9-10	79750	10,27
10-11	67326	8,67
11-12	52804	6,80
12-13	38438	4,95
13-14	26014	3,35
14-15	16229	2,09
15-16	9396	1,21
16-17	4969	0,64
17-18	2407	0,31
18-19	1087	0,14
19-20	465	0,06
>20	233	0,03
TOTAL	776.540	100

Os dados do vento tabulados e representados são obtidos através de medições de vento realizadas em estações anemométricas, que medem o vento em períodos discretos de tempo. (CUSTÓDIO, 2002).