

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE INSTALAÇÃO DE
MICROTURBINA EÓLICA

por

Tales Lunelli

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.

Porto Alegre, dezembro de 2011



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

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE INSTALAÇÃO DE
MICROTURBINA EÓLICA

por

Tales Lunelli

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientadora: Prof. Dra. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann
UFRGS/DEMEC

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey
UFRGS/DEMEC

Prof. Dr. Volnei Borges
UFRGS/DEMEC

Porto Alegre, 5 de dezembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais *Carlos* e *Cenira*, por me apoiarem em todas as minhas escolhas e pelo exemplo de vida.

ao meu irmão *Piero* pela parceria.

a todos os meus amigos por estarem ao meu lado nas horas boas e nas nem tão boas.

a todos os professores da UFRGS, em especial à minha orientadora *Adriane*, pelos conhecimentos transmitidos.

à minha namorada *Daiana*, simplesmente por existir.

“Quem tem por que viver suporta qualquer como.”

Nietzsche

LUNELLI, T. **Avaliação da Viabilidade Técnica e Econômica de Instalação de Microturbina Eólica**. 2011. 16 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade de instalação de uma pequena turbina eólica em uma casa experimental de alta eficiência energética, como parte de um sistema que visa torná-la auto-suficiente em energia elétrica. Para a análise da distribuição dos ventos na região da casa, foram utilizados dados históricos de vento disponíveis no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Os dados de vento obtidos, velocidade média anual, fator de forma da distribuição de Weibull e altura de rugosidade, foram inseridos no *software* livre ALWIN, juntamente com as curvas de potência de três aerogeradores selecionados, obtendo-se o valor da previsão de energia gerada em um ano para cada modelo de turbina eólica estudado. Posteriormente, é apresentado o estudo de viabilidade econômica para os dois aerogeradores que apresentaram melhor desempenho para o regime de vento no local, utilizando o conceito de taxa interna de retorno (TIR). Um dos aerogeradores mostrou-se viável economicamente. Por fim, são apresentadas sugestões para a continuidade do trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica, Microturbina Eólica, Viabilidade Técnica e Econômica, Fator de Capacidade.

LUNELLI, T. **Evaluation of Technical and Economic Feasibility of Installation of Wind Microturbine**. 2011. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

The present paper aims to study the feasibility of installation of wind microturbine in an energy efficient experimental house, to as part of a system designed to make it self-sufficient in electricity. To analyze the distribution of winds in the area of the house, was used historical data available in the Wind Atlas of Brazilian Wind Potential. The obtained wind data, annual average speed, shape factor form Weibull distribution and height of roughness, were entered into the free software ALWIN, along with power curves of three selected wind turbines, resulting in the value of generated energy prediction in one year for each turbine. Subsequently, is presented the economic feasibility study for the two turbines that performed best for the wind regime in place, using the concept of internal rate of return (IRR). One of the turbines proved be economically viable. Finally, suggestions were presented for the continuation of work.

KEYWORDS: Wind Energy, Wind Microturbine, Technical and Economic Feasibility, Capacity Factor.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1.	Potência do vento	1
2.2.	Distribuição de velocidade do vento	2
2.3.	Perfil de velocidade do vento – camada limite atmosférica	3
2.4.	Energia gerada	3
2.5.	Fator de capacidade	4
2.6.	Geração distribuída	4
3.	DESCRIÇÃO DO LOCAL	4
4.	VIABILIDADE TÉCNICA	5
4.1.	Legislação	5
4.2.	Estimativa do potencial eólico	6
4.3.	Pré-seleção dos aerogeradores	9
4.4.	Curvas de potência dos aerogeradores	9
4.5.	Estimativa de geração de energia	9
5.	VIABILIDADE ECONÔMICA	11
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
	Apêndice	16
	Apêndice A – Curvas de potência das turbinas eólicas	16

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações na atualidade é a crescente demanda da sociedade por energia e as consequências que ela traz ao meio ambiente. Isso está mudando a forma de vida das pessoas. Encontrar formas para reduzir o consumo de energia, especialmente de fontes não renováveis, está cada vez mais em pauta em diversos trabalhos e pesquisas científicas.

Pensando nesta maneira sustentável de viver, está sendo desenvolvida a *Casa e*. Localizada próximo ao Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a *Casa e* é uma casa-conceito experimental e demonstrativa que objetiva projetar, realizar e testar conceitos inovadores, desenvolver e demonstrar tecnologias viáveis e não agressivas ao ambiente e estabelecer parcerias para a introdução de energias e recursos renováveis em atividades sustentáveis. A figura 1.1 mostra uma foto da fachada da *Casa e*.

Visando tornar a casa auto-suficiente em energia elétrica, ou reduzir seu consumo de energia da rede, o presente trabalho estuda a viabilidade técnica e econômica da instalação de uma micro-turbina eólica na *Casa e*, utilizando dados de vento do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro e do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul.



Figura 1.1 – Fachada da *Casa e*. Fonte: acervo do autor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energia eólica é a energia cinética do ar em movimento, o vento.

O vento varia constantemente, tanto na velocidade de escoamento quanto na direção do seu deslocamento. Para o seu aproveitamento energético, há necessidade de estudar o seu comportamento espacial e temporal (Custódio, 2009).

Segundo Costa et al., 2009, a produção de energia elétrica a partir da energia eólica apresenta baixo impacto ambiental, permite a utilização conectada à rede ou em locais remotos – onde os custos de transmissão são altos –, a extração em terra e em alto mar, e ainda a ocupação concomitante do solo para a agricultura sem perigo para as atividades agropecuárias.

2.1. Potência do vento

A potência disponível no vento é função da velocidade do vento, da área do rotor e da massa específica do ar, e pode ser expressa por

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

onde P é a potência disponível do vento, ρ é a massa específica do ar, A é a área da seção transversal do rotor da turbina eólica e v a velocidade do vento. Entretanto, nem toda a potência disponível no vento pode ser extraída pela turbina eólica. A máxima potência que pode ser extraída do vento por uma turbina eólica apresenta uma limitação que é referente a uma velocidade do vento na saída do rotor eólico que não pode ser inferior a 1/3 da velocidade do vento incidente v (Custódio, 2009). Nesta condição, a potência máxima que pode ser extraída do vento por uma turbina ideal é dada por

$$P_{MAX} = \frac{16}{27} P \quad (2.2)$$

onde P_{MAX} é a potência máxima. Portanto, uma turbina eólica poderá extrair no máximo 16/27 da potência disponível no vento, o que representa 59,3 %. Esse valor é chamado de coeficiente de Betz.

Uma turbina real somente fará a extração de parte deste máximo, devido às perdas aerodinâmicas na conversão da energia eólica. O coeficiente de potência C_p indica a relação entre a potência realmente extraída do vento e a potência disponível no vento, conforme a equação

$$C_p = \frac{P_E}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (2.3)$$

onde C_p é o coeficiente de potência e P_E é a potência produzida na turbina eólica. O coeficiente de potência varia com a velocidade do vento, pois a eficiência aerodinâmica das pás do rotor da turbina depende da velocidade do vento incidente.

2.2. Distribuição de velocidade do vento

A distribuição da velocidade do vento pode ser representada por uma função de densidade de probabilidade $f(v)$, sendo que a mais adequada à distribuição do vento é a função de Weibull, dada pela expressão

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (2.4)$$

onde c é o fator de escala e k o fator de forma. O fator de escala c está relacionado com a velocidade média do vento no local, sendo expresso em unidades de velocidade. O fator de forma está relacionado com a variância da velocidade do vento em torno da velocidade média e é adimensional. A figura 3.1 mostra várias curvas de Weibull para diferentes fatores de forma k .

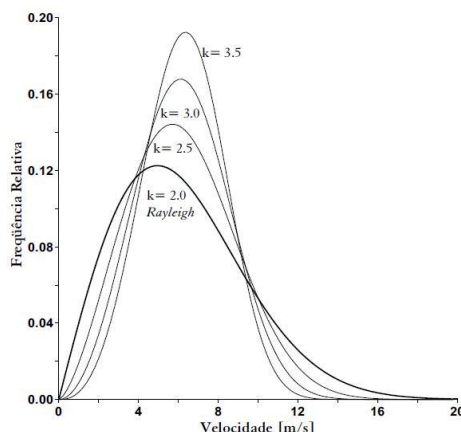


Figura 2.1 – Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma k . Fonte: Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2002.

Quando $k = 2$, a distribuição é conhecida como distribuição de Rayleigh. Ela é usada quando não se dispõe de dados para a estimativa do fator de forma, por ser a que melhor representa a distribuição de frequência do vento (Custódio, 2009).

2.3. Perfil de velocidade do vento – camada limite atmosférica

A partir de aproximadamente mil metros de altura, as características da superfície do terreno deixam de ter influência significativa sobre o vento. Na região que abrange a camada-limite atmosférica, a velocidade do vento é afetada pela fricção com a superfície terrestre (Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2002).

O perfil de velocidade vertical do vento pode ser aproximado pela lei logarítmica segundo a relação

$$v(z) = \frac{v_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.5)$$

onde $v(z)$ é a velocidade do vento na altura z , z_0 é a altura de rugosidade do terreno, κ é a constante de *Von Kármán* (aproximadamente igual a 0,4) e v_* é a velocidade de fricção. Esta relação leva em conta apenas a influência da rugosidade no perfil de velocidade, negligenciando o efeito da estratificação térmica da atmosfera. Assim, desvios significativos podem ocorrer em relação ao perfil de velocidade real da atmosfera.

2.4. Energia gerada

A energia anual produzida por uma turbina eólica é obtida através da integração da potência extraída no período, dada pela equação 2.6 (Custódio, 2002).

$$E = \int_t P(v(t))dt \quad (2.6)$$

onde E é a energia anual estimada e $P(v(t))$ é a potência em função da velocidade do vento, esta última obtida através da curva característica da máquina. A figura a seguir mostra uma típica curva de potência de uma turbina eólica.

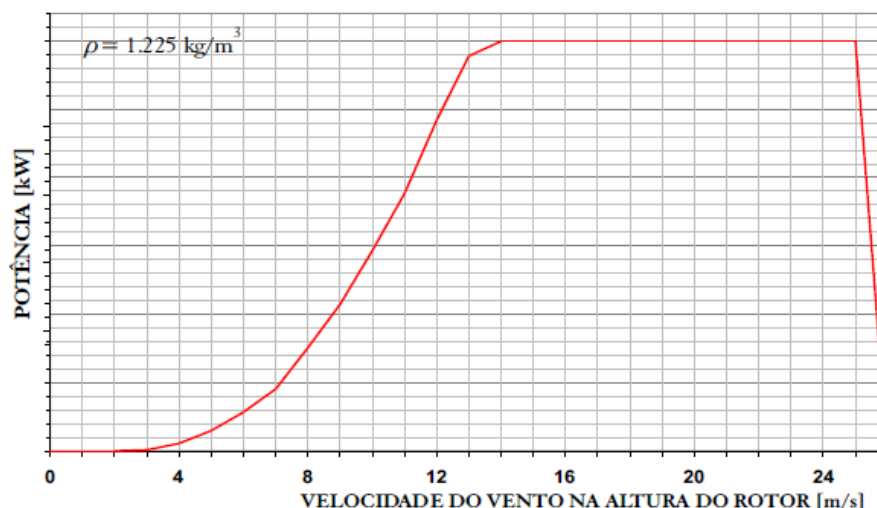


Figura 2.2 – Curva típica de potência de turbina eólica. Fonte: Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2002.

2.5. Fator de capacidade

O fator de capacidade é a relação entre a energia elétrica gerada por uma máquina, tendo em vista o regime de ventos no local, e a capacidade nominal de produção do aerogerador. Ele depende da relação entre as características da máquina e da distribuição de ventos no local da instalação do aerogerador (Custódio, 2002). É calculado pela equação

$$F_C = \frac{E_P}{E_N} \quad (2.7)$$

sendo F_C o fator de capacidade, E_P a energia pretendida e E_N a energia nominal (representa a energia gerada caso a máquina opere 100% do tempo em potência nominal).

Conforme observado por Petry e Mattuella, 2007, o fator de capacidade expressa a qualidade de um projeto em termos de potencial eólico além da eficiência da instalação da turbina eólica empregada.

2.6. Geração distribuída

Ackermann, 2001, sugere que a geração distribuída de energia pode ser definida como uma fonte de geração conectada diretamente na rede de distribuição ou ao consumidor. A geração distribuída normalmente não ultrapassa a potência instalada de 30 MW.

Conforme descrito por Borges, 2009, para o estudo de viabilidade técnica de pequenos aerogeradores, devem ser considerados alguns parâmetros, como escolha do local, realização de medições de vento no local escolhido e definição do comportamento e características do vento no local, escolha dos aerogeradores, energia gerada, escolha da conexão à rede e definição do projeto de conexão e, por fim, a determinação dos investimentos necessários à implantação do sistema. Já para o estudo da viabilidade econômica, deve-se avaliar o custo durante o ciclo de vida do projeto que é a soma de todos os custos em um dado período de tempo, ajustados ao valor presente, e pode ser dividido em duas categorias: custos de investimento (equipamentos, obras civis, execução do projeto, conexão à rede, medição e acesso) e custos operacionais (manutenção corretiva e preventiva).

3. DESCRIÇÃO DO LOCAL

A Casa e é uma casa do tipo *envelope house*, ou seja, uma casa com envoltória de paredes externas, sobrepiso e sobreteto internos, privilegiando a ventilação e o resfriamento. A casa é alongada na direção leste-oeste, tendo a leste e a oeste arborização caduca de crescimento rápido e porte médio. Ao sul, a mata nativa está preservada, com grande diversidade de espécies perenes (Horowitz et al., 2008).

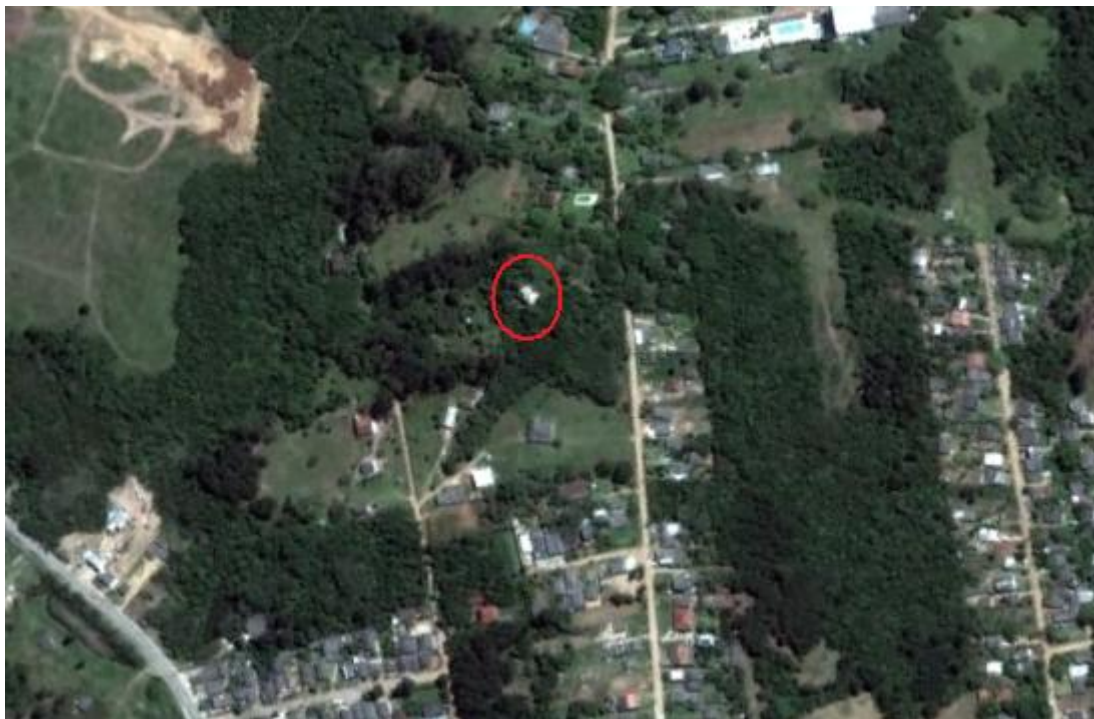


Figura 3.1 – Localização da Casa e. Adaptado de Google, 2011.

A figura 3.1 mostra a localização geográfica da Casa e. A figura foi obtida através do Google Earth, uma ferramenta disponibilizada gratuitamente na internet onde é possível visualizar imagens de satélite. A casa se encontra a uma altitude de 123 m em relação ao nível do mar e suas coordenadas geográficas são 30°08'15" S 51°05'07" O. Uma foto da fachada da Casa e está mostrada na figura 1.1.

4. VIABILIDADE TÉCNICA

4.1. Legislação

Há anos em debate, tramita na Câmara dos Deputados uma proposta que permite a criação de fundo especial para incentivar a produção de geração eólica e solar. O projeto de lei 630/2003, estabelece a criação do fundo, que receberia 8% dos recursos oriundos da Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos (CFURH), para "financiamento de projetos e programas de pesquisa científica e tecnológica, bem como a produção de insumos e equipamentos para geração". O tema encontra-se em tramitação em comissão especial criada para dar parecer ao projeto.

Em outubro do presente ano, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) apresentou, em audiência pública intitulada "Redução de Barreiras para Geração Distribuída de Pequeno Porte, Conectadas na Rede de Distribuição, e para Fonte Solar", propostas para facilitar o acesso de pequenas centrais geradoras, com até 1 MW de potência instalada e cuja fonte energética seja incentivada, normalmente conectadas em baixa ou média tensão.

O sistema de compensação de energia proposto na Audiência é chamado *Net Metering*, que consiste na medição do fluxo de energia em uma unidade consumidora por meio de

medidores bidirecionais. Dessa forma, se em um período de faturamento a energia gerada for maior que a consumida, o consumidor receberia um crédito em energia (em kWh) na próxima fatura. Caso contrário, o consumidor pagaria apenas a diferença entre a energia consumida e a gerada. Pode-se considerar o Sistema de Compensação de Energia como uma ação de eficiência energética, pois haverá redução de consumo e do carregamento dos alimentadores em regiões com densidade alta de carga, com redução de perdas. Além disso, a energia gerada que não for consumida pode ser utilizada para compensar o consumo de outras unidades cadastradas, atendidas pela mesma distribuidora, cujo titular seja o mesmo da unidade com compensação de energia. Este sistema é adotado em diversos países europeus, além de Japão, Canadá e Estados Unidos (ANEEL, 2011).

4.2. Estimativa do potencial eólico

Para uma estimativa inicial do potencial eólico, foram coletados dados de velocidade média do vento junto ao 8º Distrito de Meteorologia (DISME). Os dados são mostrados na figura 4.1 e correspondem ao período de janeiro de 2000 até dezembro de 2010. As velocidades médias registradas no 8º DISME são relativamente baixas, pois o local onde se encontra a torre anemométrica é rodeado de árvores e não muito elevado (Wenzel, 2006), apenas 10 metros acima no nível do solo.

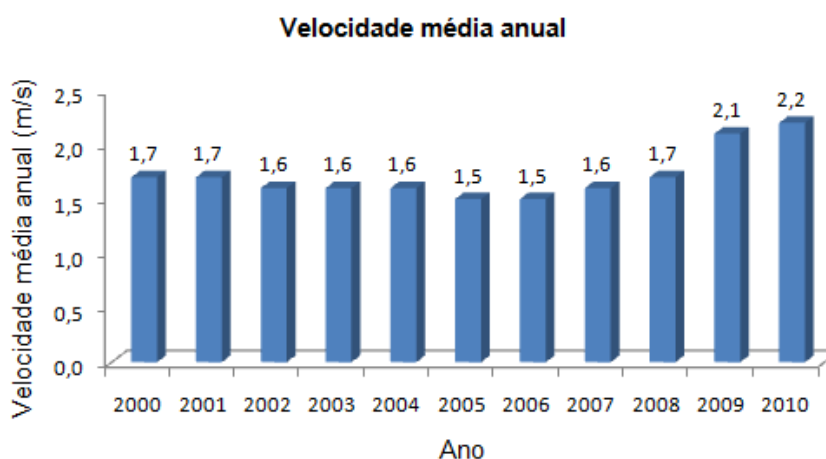


Figura 4.1 – Velocidades médias anuais do vento. Fonte: 8º DISME.

Com o intuito de aumentar a confiabilidade do valor da velocidade média do vento na região da casa, foram considerados os dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, do ano de 2001, que apresenta dados consolidados de velocidade média e direção do vento anual e sazonal a uma altura de 50 metros para todo o território nacional na resolução de 1 km x 1 km. Estas informações estão disponíveis publicamente na forma de mapas temáticos no site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). As consultas também podem ser feitas inserindo as coordenadas geográficas desejadas.

A figura 4.2 mostra o mapa temático da velocidade média anual para todo o estado do Rio Grande do Sul na altura de 50 m. Na região de interesse o valor da velocidade média é de, aproximadamente, 6 m/s.

A figura 4.3 traz os valores de velocidade média do vento divididos em 4 grupos de 3 meses cada, obtidos após serem inseridos os valores das coordenadas de latitude e longitude do local desejado no Atlas Brasileiro (CRESESB, 2011). A velocidade média anual obtida é de 5,5 m/s. Além das velocidades, o Atlas Brasileiro fornece os valores médios dos parâmetros c e k de Weibull.

Observa-se que os dados retirados do Atlas Brasileiro estão compatíveis com os dados retirados do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul.

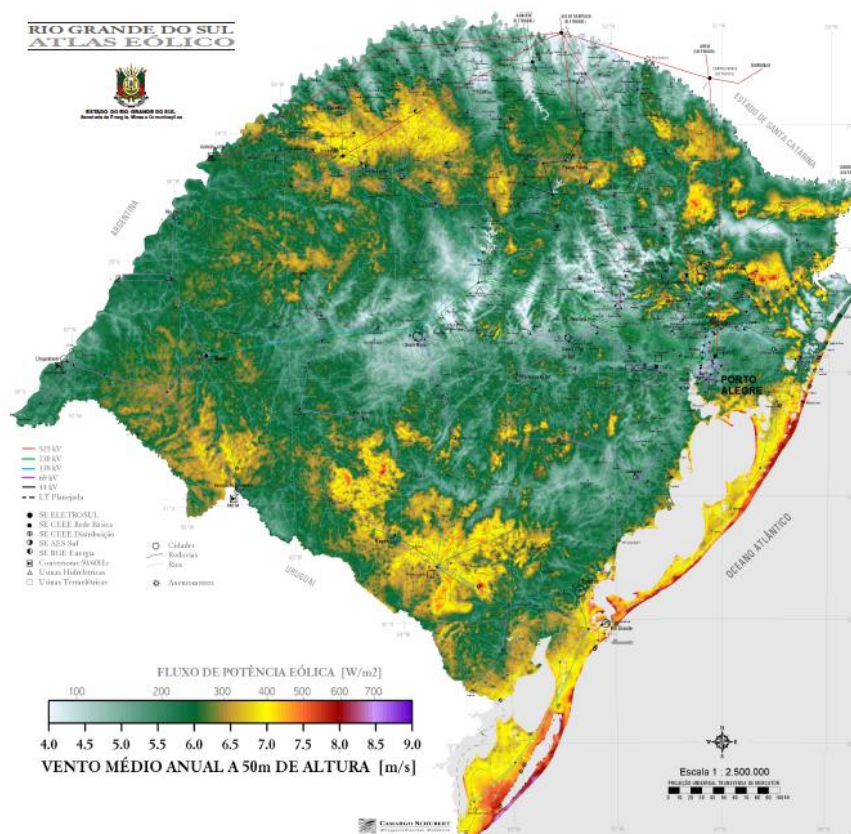


Figura 4.2 – Velocidade média anual do vento. Fonte: Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2002.

Dados de Vento

Latitude: 30,137500° Sul

Longitude: 51,085278° Oeste

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro				Dados de Vento Sazonal a 50 m de Altura			
Grandeza	Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov
velocidade	30,144236°S	51,077519°O	1,0584	5,4968	5,3647	5,5488	5,6123
fator k	30,107715°S	51,087328°O	3,3215	2,3469	2,1741	2,2173	2,4029
fator c	30,180476°S	51,053766°O	5,6645	6,8641	6,7824	6,5412	6,7289

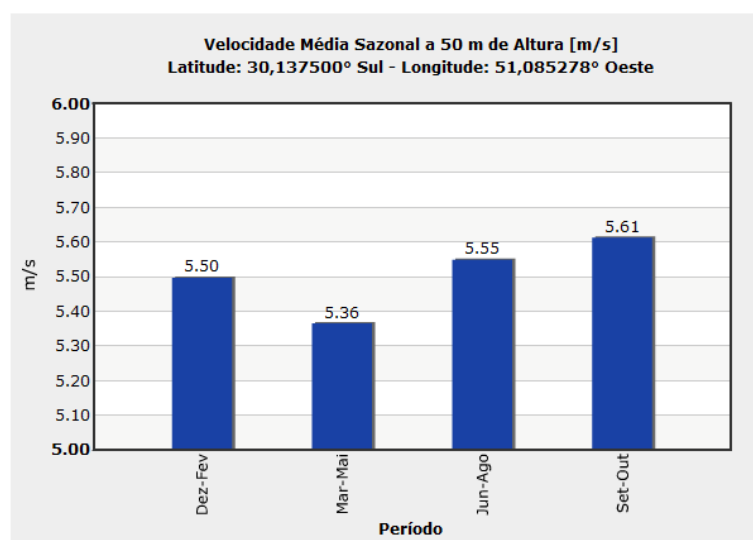


Figura 4.3 – Velocidade média anual do vento e parâmetros de Weibull. Fonte: CRESESB, 2011.

4.3. Pré-seleção dos aerogeradores

A turbina eólica a ser instalada deve fornecer uma quantidade de energia significativa, deve ser silenciosa, economicamente viável e ser esteticamente harmoniosa com a casa.

Diferentes modelos de aerogeradores devem ser avaliados para fazer o cruzamento com os dados eólicos e definir qual é mais adequado ao local. Emprega-se o *software* ALWIN para obter a integração definida na equação 2.6, bem como o fator de capacidade, equação 2.7.

Foram pré-selecionados os seguintes aerogeradores, levando em conta a disponibilidade no país:

- Skystream 3.7: é uma turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) que possui potência nominal de 2,4 kW e velocidade nominal de 9,4 m/s. Esta turbina produz energia mesmo com ventos fracos. É silenciosa e pode ser instalada em residências ou pequenas empresas.
- UGE-4K: sua potência nominal é de 4 kW e possui velocidade nominal de 12 m/s. Possui rotor com diâmetro de 4,2 m. É uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV), possui baixo ruído e capacidade de captação de vento em todas as direções, ideal para instalações em zonas urbanas.
- VERNE555: é uma TEEH e possui controle de velocidade por estol (as pás do rotor não giram em torno dos seus eixos longitudinais). É confeccionada em alumínio, possui 3 pás, sendo que o diâmetro da hélice é de 5,55 m. Sua potência nominal é de 6 kW. Esta turbina é fabricada no Brasil, o que a torna atrativa economicamente.

A figura 4.5 mostra as imagens de cada uma das microturbinas pré-selecionadas.



Figura 4.5 – Da esquerda para a direita os aerogeradores Skystream 3.7, UGE-4K e VERNE555.

4.4. Curvas de potência dos aerogeradores

As curvas de potência dos aerogeradores foram obtidas junto aos fabricantes (curvas características). Os dados obtidos foram inseridos manualmente no *software* ALWIN. Suas curvas de potência estão mostradas no Apêndice A.

4.5. Estimativa de geração de energia

Feita a descrição do local e selecionados os equipamentos, o *software* ALWIN calcula a previsão da energia anual gerada por cada um dos equipamentos, equação 2.6, a potência

média desenvolvida, bem como o fator de capacidade, equação 2.7, todos calculados para ambas as distribuições de velocidade (Weibull e Rayleigh). A altura da instalação da turbina foi considerada como sendo 35 m acima do nível do solo e a rugosidade média do local foi considerada como $z_0=0.8$ m (Atlas Eólico do Rio Grande do sul, 2002). As figuras 4.6, 4.7 e 4.8 mostram os resultados obtidos para cada uma das turbinas.

Casa e

Time: Meas.Height: 50.0 m
Altitude: 123 m Temperature: 20.0 °C

Skystream 3.7

Hub Height: 35.0 m
Conversion factor (log): 0.914 ($Z_0 = 0.800$ m)

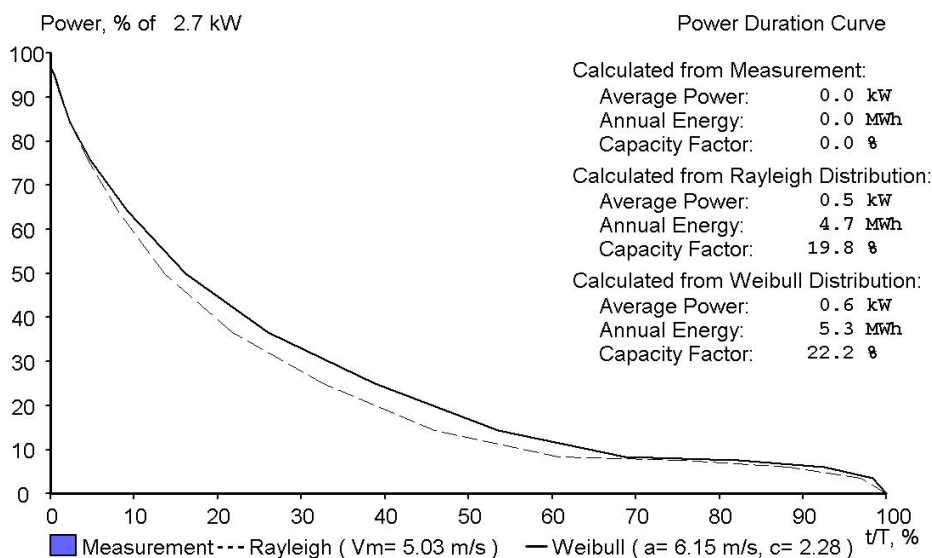


Figura 4.7 – Previsão de energia produzida pela turbina Skystream 3.7.

Casa e

Time: Meas.Height: 50.0 m
Altitude: 123 m Temperature: 20.0 °C

UGE-4K

Hub Height: 35.0 m
Conversion factor (log): 0.914 ($Z_0 = 0.800$ m)

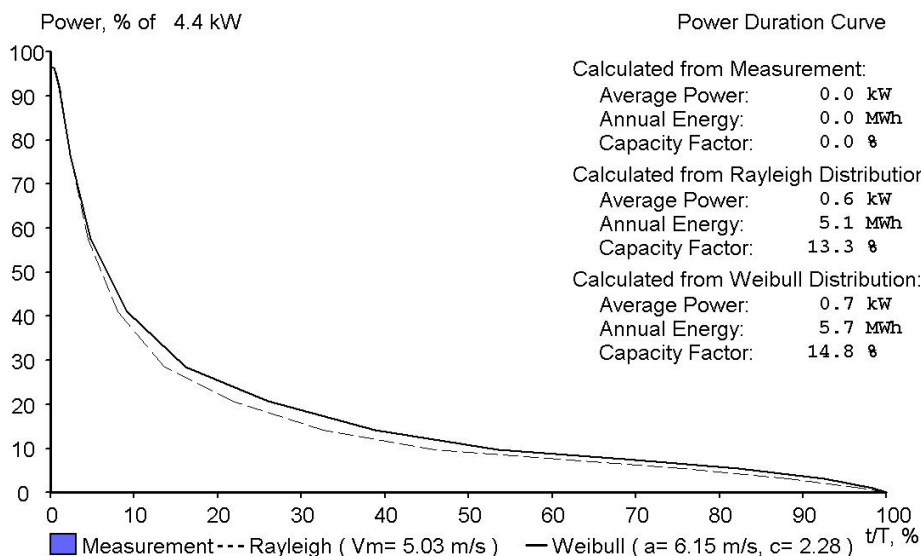


Figura 4.7 – Previsão de energia produzida pela turbina UGE-4K.

Casa e

Time:
Altitude: 123 m

Meas. Height: 50.0 m
Temperature: 20.0 °C

VERNE555

Hub Height: 35.0 m
Conversion factor (log): 0.914 (Z0 = 0.800 m)

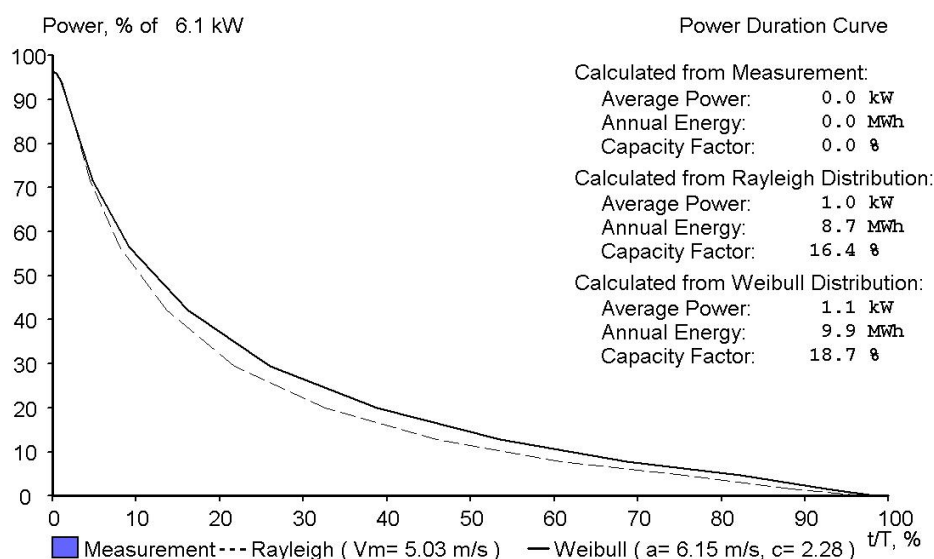


Figura 4.8 – Previsão de energia produzida pela turbina VERNE555.

As figuras 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os valores de previsão de energia produzida, o fator de capacidade correspondente e as curvas de duração de potência, para cada uma das turbinas analisadas. As curvas de duração de potência indicam o percentual do tempo total (um ano) em que a turbina operou para cada faixa de potência (em valor percentual da potência máxima da máquina). Ou seja, os gráficos indicam a porcentagem de tempo em que a turbina opera em uma dada potência ou em uma potência superior a esta.

Nestes gráficos, percebe-se que as turbinas que apresentam os melhores desempenhos são a VERNE555 e a Skystream 3.7. Apesar de a turbina VERNE555 apresentar a maior previsão de energia, esta pode não ser a mais viável economicamente. Da mesma forma a turbina Skystream 3.7, que apresenta o maior fator de capacidade, pois outras variáveis, como o custo do investimento inicial, devem ser considerados. Nas pequenas turbinas a grande variação do custo específico (por unidade de potência nominal) varia significativamente, podendo alterar o resultado esperado.

A análise de viabilidade econômica para ambas as turbinas é desenvolvida no capítulo 5.

5. VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a análise econômica utilizou-se o cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR). A TIR é a taxa de juros que iguala o valor presente das entradas com o das saídas previstas de caixa. Se a TIR for maior que o custo de capital, aceita-se o projeto; se for menor, rejeita-se o projeto (Gitman, 2002). Para o caso de instalação de uma microturbina eólica, considerando um tempo de 20 anos (vida útil aproximada desse tipo de equipamento), se a TIR for maior que zero, o projeto é economicamente viável. Se ela for menor que zero, o projeto é inviável. A equação 5.1 é usada para calcular a TIR:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{VP}{(1 + TIR)^t} - I_0 \quad (5.1)$$

onde VP é o valor presente das entradas de caixa, I_0 é o investimento inicial, TIR é a taxa interna de retorno, t é o tempo de desconto de cada entrada de caixa e n , o tempo de desconto do último fluxo de caixa (Gitman, 2002). Esta equação pode ser resolvida com o auxílio de ferramentas computacionais. O Excel possui uma função que calcula a TIR. Basta selecionar o intervalo dos fluxos de caixa a serem considerados usando a função TIR e o Excel fornece o seu valor.

Os dados para o cálculo financeiro de ambas as turbinas foram inseridos em planilhas que consideram perdas, gastos com operação e manutenção e seguros, para os 20 anos de operação. De posse do fluxo de caixa do 1° ao 20° ano, é possível calcular a TIR para este período.

Os dados de entrada para as turbinas são suas potências nominais, seus fatores de capacidade, a previsão de energia gerada, o período de tempo considerado (neste caso igual a 1 ano) e o coeficiente de disponibilidade considerado como 96%. O custo da energia elétrica fornecida pela concessionária é de R\$ 400,00/MW, considerando PIS, COFINS e ICMS. A tabela 5.1 mostra os custos das turbinas, de acordo com o preço de mercado adquirido junto aos vendedores das mesmas. Nesta análise, considerou-se que o valor total será pago com capital próprio e à vista.

Tabela 5.1 – Custos das turbinas.

Turbina	Preço (R\$)	Preço mão-de-obra e equipamentos auxiliares (R\$)	Preço total (R\$)	Preço por unidade de potência (R\$/kW)
Skystream 3.7	28.000,00	12.000,00	40.000,00	16.667,00
VERNE555	31.500,00	13.500,00	45.000,00	7.500,00

Uma das perdas consideradas foi a de 1% sobre a energia anual comercializada e se dá devido a perdas na rede elétrica. O gasto anual com operação e manutenção (O&M) foi estimado em R\$ 50,00/kW, a partir do 3° ano em operação. Gastos com seguros foram estimados em 1% sobre o preço da turbina. Demais despesas foram desconsideradas na análise. As tabelas 5.2 e 5.3 mostram as planilhas resumidas de fluxo de caixa para as turbinas Skystream 3.7 e VERNE555, respectivamente.

Tabela 5.2 – Fluxo de caixa para a turbina Skystream 3.7.

Dados de entrada		Investimento					
Energia de Referência	5,3 MWh	Total	R\$ 40.000,00				
Potencia Nominal	0,0024 MW	Valor Unitário	R\$ 16.666,67 R\$/kW				
Número de Máquinas	1	Capital Próprio	R\$ 40.000,00				
Fator de Capacidade	22,2%						
Período	8760 horas (1 ano)						
Coefficiente de disponibilidade	96%						
Valor da Comercialização	R\$ 400,00 R\$/MWh						
Resultado do exercício		1º ano	2º ano	3º ano	4º ano	...	20º ano
Energia Comercializada		R\$ 2.120,00	R\$ 2.120,00	R\$ 2.120,00	R\$ 2.120,00	...	R\$ 2.120,00
Perdas	1%	R\$ 21,20	R\$ 21,20	R\$ 21,20	R\$ 21,20	...	R\$ 21,20
Receita Operacional		R\$ 2.098,80	R\$ 2.098,80	R\$ 2.098,80	R\$ 2.098,80	...	R\$ 2.098,80
Despesas							
O&M	50 R\$/kWa			R\$ 120,00	R\$ 120,00	...	R\$ 120,00
Seguros	1%	R\$ 280,00	R\$ 280,00	R\$ 280,00	R\$ 280,00	...	R\$ 280,00
Sub total		R\$ 280,00	R\$ 280,00	R\$ 400,00	R\$ 400,00	...	R\$ 400,00
Lucro Operacional		R\$ 1.818,80	R\$ 1.818,80	R\$ 1.698,80	R\$ 1.698,80	...	R\$ 1.698,80
Lucro Líquido		R\$ 1.818,80	R\$ 1.818,80	R\$ 1.698,80	R\$ 1.698,80	...	R\$ 1.698,80
Fluxo de caixa							
Lucro Líquido		R\$ 1.818,80	R\$ 1.818,80	R\$ 1.698,80	R\$ 1.698,80	...	R\$ 1.698,80
Investimento Total		R\$ 40.000,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	...	R\$ 0,00
Fluxo de caixa Líquido		-R\$ 38.181,20	R\$ 1.818,80	R\$ 1.698,80	R\$ 1.698,80	...	R\$ 1.698,80

TIR: -1,6%

Tabela 5.3 – Fluxo de caixa para a turbina VERNE555.

Dados de entrada		Investimento					
Energia de Referência	9,9 MWh	Total	R\$ 45.000,00				
Potencia Nominal	0,006 MW	Valor Unitário	R\$ 7.500,00 R\$/kW				
Número de Máquinas	1	Capital Próprio	R\$ 45.000,00				
Fator de Capacidade	18,7%						
Período	8760 horas (1 ano)						
Coefficiente de disponibilidade	96%						
Valor da Comercialização	R\$ 400,00 R\$/MWh						
Resultado do exercício		1º ano	2º ano	3º ano	4º ano	...	20º ano
Energia Comercializada		R\$ 3.960,00	R\$ 3.960,00	R\$ 3.960,00	R\$ 3.960,00	...	R\$ 3.960,00
Perdas	1%	R\$ 39,60	R\$ 39,60	R\$ 39,60	R\$ 39,60	...	R\$ 39,60
Receita Operacional		R\$ 3.920,40	R\$ 3.920,40	R\$ 3.920,40	R\$ 3.920,40	...	R\$ 3.920,40
Despesas							
O&M	50 R\$/kWa			R\$ 300,00	R\$ 300,00	...	R\$ 300,00
Seguros	1%	R\$ 315,00	R\$ 315,00	R\$ 315,00	R\$ 315,00	...	R\$ 315,00
Sub total		R\$ 315,00	R\$ 315,00	R\$ 615,00	R\$ 615,00	...	R\$ 615,00
Lucro Operacional		R\$ 3.605,40	R\$ 3.605,40	R\$ 3.305,40	R\$ 3.305,40	...	R\$ 3.305,40
Lucro Líquido		R\$ 3.605,40	R\$ 3.605,40	R\$ 3.305,40	R\$ 3.305,40	...	R\$ 3.305,40
Fluxo de caixa							
Lucro Líquido		R\$ 3.605,40	R\$ 3.605,40	R\$ 3.305,40	R\$ 3.305,40	...	R\$ 3.305,40
Investimento Total		R\$ 45.000,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	...	R\$ 0,00
Fluxo de caixa Líquido		-R\$ 41.394,60	R\$ 3.605,40	R\$ 3.305,40	R\$ 3.305,40	...	R\$ 3.305,40

TIR: 4,65%

No primeiro ano de operação, ambas as turbinas apresentam um fluxo de caixa negativo, pois foi computado o custo de aquisição do equipamento. A partir do segundo ano, as turbinas já apresentaram fluxo de caixa positivo. Do terceiro ano em diante, o fluxo de caixa

também é positivo, porém o custo de manutenção reduz um pouco o valor do fluxo em comparação com o segundo ano.

Observa-se nestas tabelas que a turbina VERNE555 apresenta uma TIR de 4,65%, sendo a única que apresenta retorno econômico no período de 20 anos. A TIR da turbina Skystream 3.7 resultou em um valor negativo, não sendo atrativa economicamente, apesar do seu alto fator de capacidade.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O estudo da viabilidade técnica trouxe um resultado positivo. O fator de capacidade e a energia anual gerada, resultantes do cruzamento entre os dados do regime de ventos e as curvas de potência das microturbinas, apresentaram valores razoáveis para o vento urbano considerando os dados dos Atlas Eólicos Brasileiro e do Rio Grande do Sul.

Para a turbina Skystream 3.7 o fator de capacidade resultou em 22%, sua energia anual foi prevista em 5,3 MWh e seu custo é aproximadamente R\$ 40.000,00, incluindo instalação. Já para a turbina VERNE555 o fator de capacidade encontrado foi de 18,7% com previsão de energia anual de 9,9 MWh e um custo total de R\$ 45.000,00.

A análise econômica se mostrou viável apenas para a turbina VERNE555, pois o resultado positivo médio anual apresenta um valor razoável, aproximadamente R\$ 1.080,00, e a TIR é de 4,86%. A turbina Skystream 3.7 apresentou TIR negativa, sendo inviável economicamente. A viabilidade econômica para a turbina VERNE555 ocorreu porque foi considerada a remuneração da energia pelo preço de compra da concessionária. Ou seja, a instalação é viável apenas com o sistema de conta-corrente de energia.

Como sugestão para a continuidade do trabalho pode-se citar a instalação de um anemômetro na casa localizado a uma altura de 35 m (altura de instalação que foi considerada neste estudo), para validação dos resultados. Além disso, a instalação do anemômetro na casa pode trazer resultados mais precisos que poderão ser usados para cruzar os dados de potencial eólico disponível com o período de consumo no ano, bem como dados de direção do vento e direção dos obstáculos ou maior rugosidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackermann, T., Andersson, G., Söder, L. **“Distributed generation: a definition”**, 2001.
- ANEEL, disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em novembro de 2011.
- Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001. CD-ROM
- Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2002. CD-ROM.
- Borges, L. C. **“Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de Energia Elétrica Distribuída Utilizando Pequenos Aerogeradores. Análise dos Principais Aspectos Para Ampliar a Viabilidade”**, Porto Alegre, 2009.
- Costa, R. A. D., Casotti, B. P., Azevedo, R. L. S. D. **“Um Panorama da Indústria de Bens de Capital Relacionados à Energia Eólica”**, Rio de Janeiro, 2009.
- CRESESB, disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em outubro de 2011.
- Custódio, R., S. **“Parâmetros de Projeto de Fazendas Eólicas e Aplicação Específica no Rio Grande do Sul”**, Porto Alegre, 2002.
- Custódio, R. S. **“Energia eólica para produção de energia elétrica”**, Eletrobrás, 2009.

Gitman, L. J. "**Princípios de Administração Financeira**", Harbra, 2010.

Google. Google Earth, disponível em <<http://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/download/ge/agree.html>>. Acesso em setembro de 2011.

Horowitz, F., Azambuja, G. B., Michels, A. F., Ribeiro, R. S. "**Estratégias para conforto térmico com captação solar em casa-envoltória no (sub)tropical úmido**", Florianópolis, 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.

Urban Green Energy, disponível em: <<http://www.urbangreenenergy.com>>. Acesso em setembro de 2011.

Wenzel, G. M., Lopez, H. F., Villar, J. A. A. "**Estudo da Implementação de Sistema Eólico em Prédio da Empresa Auxiliadora Predial**", Recife, 2006.

Apêndice

Apêndice A – Curvas de potência das turbinas eólicas

Conforme descrito no capítulo 4, as curvas de potência das turbinas são mostradas nas figuras A.1, A.2 e A.3.

Wind Energy Converter:
Skystream 3.7

Catalog: WKA_DEMO.CAT
Hub Height: 35.0 m
Control: STALL

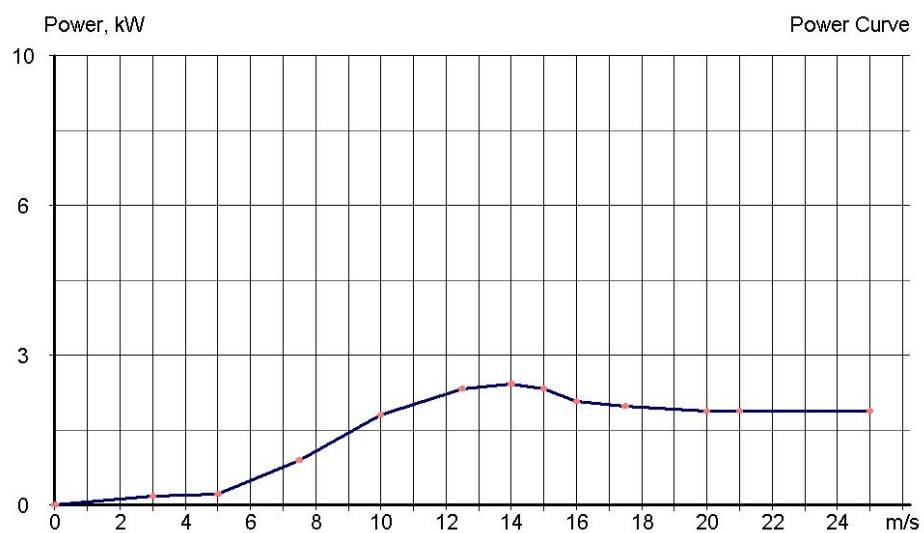


Figura A.1 – Curva de potência da turbina Skystream 3.7.

Wind Energy Converter:
UGE-4K

Catalog: WKA_DEMO.CAT
Hub Height: 35.0 m
Control: STALL

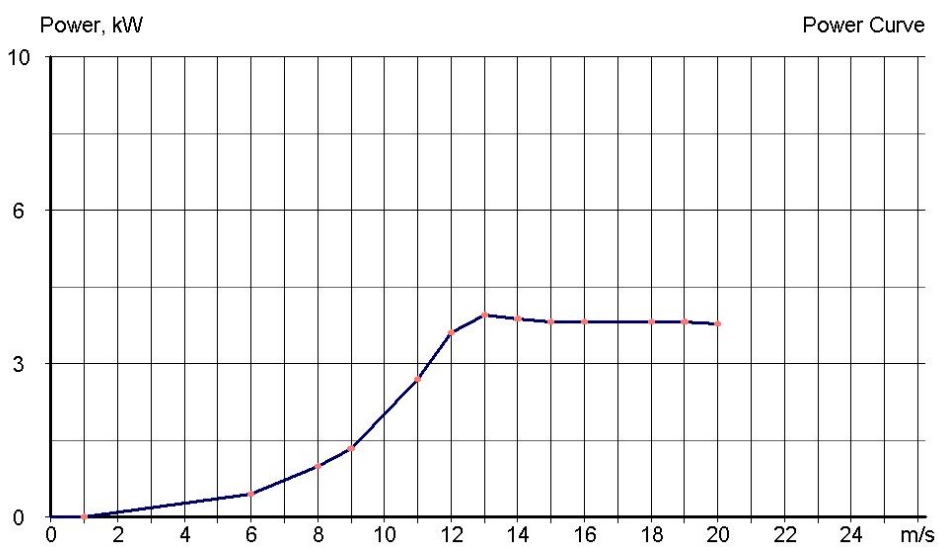


Figura A.2 – Curva de potência da turbina UGE-4K.

Wind Energy Converter:
VERNE555

Catalog: WKA_DEMO.CAT
Hub Height: 35.0 m
Control: STALL

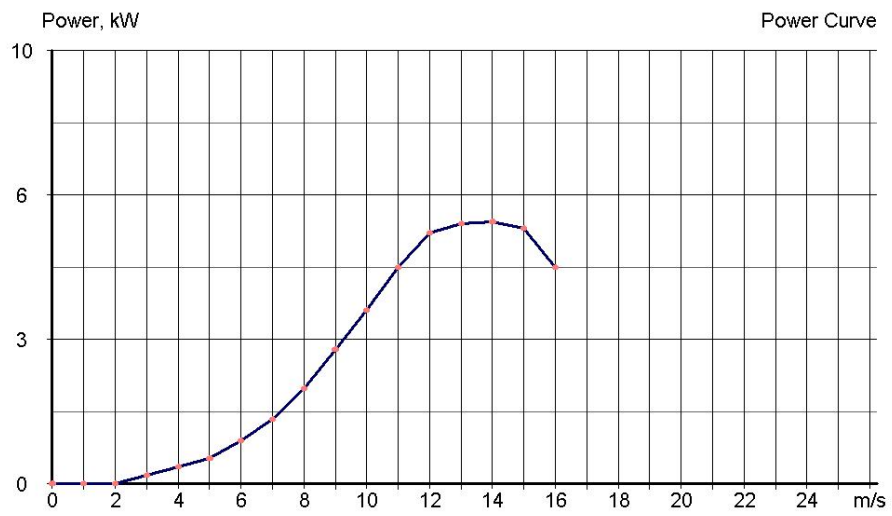


Figura A.3 – Curva de potência da turbina VERNE555.