



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

UM ESTUDO DA VIABILIDADE DE PEQUENOS
AEROGERADORES NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELETRICA

GILBERTO MARTINS DE MELO

RECIFE, DEZEMBRO DE 2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

UM ESTUDO DA VIABILIDADE DE PEQUENOS
AEROGERADORES NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELETRICA

Dissertação submetida à Universidade Federal de Pernambuco para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Autor: Gilberto Martins de Melo

Orientador: Prof. Dr. Alex Mauricio Araujo.

RECIFE, DEZEMBRO DE 2009

M528e Melo, Gilberto Martins de.
Um estudo da viabilidade de pequenos aerogeradores na
produção de energia elétrica / Gilberto Martins de Melo. - Recife: O
Autor, 2009.
76 folhas, il : figs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.

Orientador: Prof. Dr. Alex Mauricio Araujo.
Inclui Bibliografia e Anexo.

1. Engenharia Mecânica. 2. Perfil Energético Local (PEL).
3. Turbinas de Pequeno Porte. 4. Coeficiente de Potência. I. Título.
UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2010-218

UM ESTUDO DA VIABILIDADE DE PEQUENOS
AEROGERADORES NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELETRICA

GILBERTO MARTINS DE MELO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr. ALEX MAURICIO ARAUJO
ORIENTADOR/PRESIDENTE



Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO CURSO

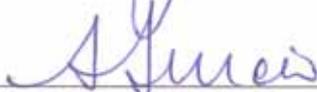
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. ALEX MAURICIO ARAUJO (UFPE)



Prof. Dr. MAURILIO JOSE DOS SANTOS (UFPE)



Prof. Dr. ARMANDO LUCIO RAMOS DE MEDEIROS (UFPE)



Prof.^a Dra. OLGA DE CASTRO VILELA (UFPE)

Resumo

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um aplicativo e discute ambos os resultados econômicos e técnicos obtidos com um procedimento chamado PEL - perfil de energia local. Esta ferramenta é a elaboração de metodologia alternativa para a estimativa de energia elétrica obtida a partir de energia eólica disponível usando turbinas de pequeno eixo horizontal. Os dados necessários para este procedimento são registrados como série simultânea anual da temperatura de ar e velocidade do vento. A utilização do PEL, associado com o coeficiente de potência de turbinas, simplifica a tarefa de selecionar o equipamento adequado, pois PEL leva em conta a variação da massa específica do ar, altitude local e as velocidades de partida e corte do equipamento. O procedimento introduzido foi testado para o padrão anual de velocidade de vento e de temperatura medida no litoral cidade de Olinda/BR usando dados técnicos de pequenos aerogeradores comercialmente fornecidos por fabricantes nacionais e internacionais.

Os resultados econômicos obtidos com simulações utilizando turbinas pequenas indicam um cenário positivo para o uso deste equipamento como um recurso de geração de renda. Diversas possibilidades de simulações de estudos de caso e análise de resultados indicam as potencialidades deste procedimento.

O procedimento ajudará o usuário selecionando máquinas e desenvolver estudos de viabilidade técnica e econômica, com vista a uma melhor utilização da tecnologia de aerogeradores como um meio de fornecer uma fonte complementar de energia limpas e renováveis para a região.

PALAVRAS CHAVE: perfil energético local (PEL), energia eólica, turbinas de pequeno porte, regime de ventos, coeficiente de potência, financiamento, empreendedor eólico, investidor eólico.

Abstract

This work proposes the development of an application and discusses both economical and technical results achieved with a procedure called LEP - Local Energy Profile. This tool facilitates the elaboration of alternative pictures of the estimate electrical energy obtained from available wind energy using small horizontal axis turbines. The data required for this procedure are registered as annual simultaneous series of wind velocity and air temperature. The use of LEP, associated with the turbine power coefficient, simplifies the task of selecting the appropriate equipment since PEL takes in account the variation of the specific mass of air, local altitude and equipment's cut in and cut out speeds. The procedure introduced has been tested for the annual pattern of wind velocity and temperature measured at coastal city of Olinda/BR using technical data of small turbines commercially provided by both national and international manufactures.

The economical results obtained with simulations using small turbines indicate a positive scenario for the use of this equipment as an incoming resource. Various possibilities of simulations of case studies and result analysis indicate the potentialities of this procedure.

The procedure will help the user selecting machines and developing studies of technical and economical feasibility, aiming a better use of wind turbines technology as an effect way to provide a complementary source of clean and renewable energy to the region.

KEYWORDS: local energy profile (LEP), wind power, small size wind turbines, regimen of winds and temperatures, power coefficient, financing, entrepreneur, investor.

APRESENTAÇÃO	01
PRIMEIRO CAPÍTULO – ENERGIA E QUALIDADE DE VIDA	
INTRODUÇÃO	02
1.1 – O Uso da Energia Eólica	04
SEGUNDO CAPÍTULO - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCEITOS BÁSICOS DA ENERGIA EÓLICA	
2.1 - Conceitos Básicos	06
2.1.1 – Vento	06
2.1.2 – Distribuição de Weibull e Densidade de Energia do Vento	06
2.1.3 - Coeficiente de Potencia e Limite de Betz	07
2.1.4 – Solidez	07
2.1.5 – Turbulência	08
2.1.6 – Fatores de Capacidade e de Disponibilidade	09
2.2 - Tipos de Máquinas Eólicas	10
2.3 - Pequeno Aerogerador	11
2.3.1 – Rotor	11
2.3.2 - Leme direcionador	12
2.3.3 – Torre	12
2.3.4 - Geradores Elétricos e Alternadores	13
2.3.4.1 - Máquinas de Indução de Rotor Gaiola de Esquilo	14
2.3.4.2 - Geradores Síncronos	14
2.4 - Inversores	15
TERCEIRO CAPÍTULO - O MEIO AMBIENTE E A UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA	
3.1 - Uso de Aerogeradores	16
3.1.1 - Aspectos positivos	16

3.1.2 - Aspectos Negativos	16
3.2 - Impacto sobre a Fauna	16
3.3 - Perturbações Sonoras	17
3.3.1 - Ruído Mecânico	18
3.3.2 - Ruído Aerodinâmico	18
3.4 - Impacto Visual	19
3.5 - Interferências eletromagnéticas	19
QUARTO CAPÍTULO – AEROGERADORES E A REDE ELÉTRICA	
4.1 – A Qualidade da Energia Elétrica	20
4.1.1 – Tensão	20
4.1.1.1 – A Variação na Tensão	20
4.1.1.2 – Cintilamento (<i>Flicker</i>)	21
4.1.1.3 – Distorção Harmônicos	21
4.1.1.4 – Transitórios Elétricos	21
4.1.2 – Frequência	22
4.1.3 – Interrupções	22
4.1.4 – Padrão Nacional	22
4.2 – Ilhamento	22
4.3 – Sistemas Isolados	22
4.4 – Aerogeradores e Conexão à Rede Elétrica.	23
4.4.1 – Inversores para Conexão a Rede Elétrica	24
4.5 – Integração de Aerogeradores à Rede Elétrica	24
QUINTO CAPÍTULO – RECURSO ENERGÉTICO DISPONÍVEL	
5.1 - Circulação Geral da Atmosfera	25

5.2 - Recurso Eólico Disponível Local	27
5.2.1 – Padrões Característicos das Velocidades Eólicas Locais	29
5.2.2 – Padrões Característicos das Temperaturas do Ar Local	30
5.2.3 - Avaliação da Variação da Massa Específica	31
5.3 - Procedimento Utilizado para o Levantamento Energético	32
5.3.1 - Perfil da Potencia Energética Local	32

SEXTO CAPÍTULO – APLICAÇÕES COM PEQUENOS AEROGERADORES

6.1 - Levantamento da Energia Disponível no Vento na pressão Atmosférica Padrão	37
6.2 - Levantamento do Coeficiente de Potência do Aerogerador	38
6.3 - Máquinas Utilizadas	38
6.3.1 - Vergnet - GEV 6/5	39
6.3.2- Westwind 5.5 kW	39
6.3.3 – Eoltec – Scirocco	40
6.3.4 – Enersud – Verne555	40
6.4 – Cálculo dos Coeficientes de Potência dos Aerogeradores	41
6.5 – Seleção do aerogerador	42
6.6 – Comparativo entre o PEL e outros Procedimentos	43

SÉTIMO CAPÍTULO – ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA

7.1 - Técnicas Usadas na Avaliação do Investimento	46
7.2 - Custo da Energia Fornecida pela Distribuidora	46
7.3 – Valor dos Equipamentos	48
7.4 - Fontes e Condições de Financiamentos Atuais	48
7.4.1 - Procedimentos Operacionais	49
7.4.2 – Custo Financeiro	49

7.5 – Parâmetros Adotados para a Análise da Viabilidade do Investimento	50
7.6 - Viabilidade do Investimento	51
OITAVO CAPÍTULO - LEGISLAÇÃO E A QUESTÃO POLÍTICA	
8.1 – Introdução	54
8.2 – Pequenos Aerogeradores nos Estados Unidos da América	54
8.3 - Pequenos Aerogeradores no Reino Unido	55
8.4 – Pequenos Aerogeradores na Espanha	56
8.4.1 – Solicitação	56
8.4.2– Determinação das Condições Técnicas da Conexão	57
8.4.3 – Celebração do Contrato	57
8.4.4 – Conexão a Rede e Primeira Verificação	57
8.4.5 – Obrigações do Titular da Instalação	58
8.4.6 – Condições Técnicas de Caráter Geral	58
8.4.7– Condições Específicas de Interconexão	58
8.4.8 – Medição e Faturamento	58
8.5 – Pequenos Aerogeradores no Brasil	58
NONO CAPÍTULO – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	
9.1 – Conclusões	61
9.2 – Recomendações	61
BIBLIOGRAFIA	63
ANEXO A	66

APRESENTAÇÃO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo de viabilidade técnica econômica do uso de pequenos aerogeradores conectados à rede para a produção de energia elétrica por parte de autoprodutores elevando a renda familiar e aumentando a sustentabilidade de pequenos empreendimentos. Para realizar o trabalho foi desenvolvida uma metodologia específica denominada Perfil Energético Local (PEL) o qual permite identificar qual o aerogerador mais apropriado para as características de vento locais. Uma análise comparativa com método clássico de estimativa da energia anual gerada por essas máquinas também foi realizada visando avaliar os resultados obtidos com o procedimento proposto.

Na primeira parte do trabalho, se descreve a importância do uso da energia pelo ser humano e de sua necessidade para seu bem estar e evolução social, depois passa, no segundo capítulo, para os conceitos básicos e a fundamentação teórica sobre o uso do recurso eólico como fonte de energia, detalhando os tipos de pequenos aerogeradores e seus principais componentes.

Com relação aos aspectos ambientais dos empreendimentos eólicos, está apresentada, no terceiro capítulo, uma síntese dos principais aspectos levados em consideração nos estudos de avaliações dos impactos do uso de aerogeradores no meio ambiente.

No quarto capítulo foram considerados elementos essenciais referentes como a qualidade da energia elétrica é afetada pela conexão de aerogeradores a rede elétrica.

Na segunda parte, nos capítulos 5 e 6, é estudado o recurso eólico disponível, através de análises de dados das suas características físicas medidas no local, tais como: velocidade, direção, temperatura e massa específica. Nesse contexto, é proposta uma forma alternativa de tratamento dos dados primários, denominado de Perfil Energético Local (PEL) com o objetivo de facilitar a utilização dos dados eólicos na seleção dos equipamentos mais adequados ao local, e levantar o coeficiente de potência do rotor de cada aerogerador utilizado.

Como exemplo da utilização do procedimento alternativo proposto, foram analisados alguns aerogeradores pré-selecionados como candidatos potenciais a serem aplicados à disponibilidade energética local.

A terceira parte do estudo trata da análise econômico-financeira, levantando-se o valor das tarifas plenas de energia elétrica residencial, para cinco estados do nordeste brasileiro, por um período de cinco anos.

Das condições de financiamento do BNDES destinado a empreendimentos que promovam a substituição de combustíveis de origem fóssil, por fontes renováveis levantaram-se os custos financeiros aplicados ao financiamento, e avaliou-se a tendência para os encargos financeiros incidentes.

A quarta parte do trabalho faz um breve levantamento de experiências de dois países com tradição no uso de pequenos aerogeradores para produção de energia elétrica, comparativamente com a atual situação brasileira.

Na quinta e última parte estão apresentadas conclusões e sugestões, no sentido de disseminar o uso de aerogeradores de pequeno porte no Brasil.

PRIMEIRO CAPÍTULO – ENERGIA E QUALIDADE DE VIDA

INTRODUÇÃO

A água doce e a energia são os dois principais recursos que fornecem os fundamentos de toda atividade humana para uma razoável e sustentável qualidade de vida. A energia desempenha um papel fundamental para a realização dos objetivos ligados ao desenvolvimento humano sustentável nos campos econômico, social e ambiental. Sem uma fonte de energia aproveitável, nenhuma atividade humana pode evoluir.

O crescimento econômico e o populacional são os dois principais fatores que provocarão um aumento na demanda energética nas próximas décadas.

A população mundial cresce atualmente a uma taxa de 2% ao ano e exerce uma pressão adicional sobre as limitadas fontes de energia que constituem a atual matriz energética. A crescente demanda energética é parcialmente ligada ao crescimento populacional, e também a um maior consumo per capita [1].

A Agência Internacional de Energia prevê um crescimento de 50% no consumo da energia no mundo, no período compreendido entre 2005 e 2030, conforme a publicação International Energy Outlook 2008.

No Brasil, segundo dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, do Ministério de Minas e Energia, através do Balanço Energético Nacional – BEN 2008 – ano base 2007, o consumo de energia cresceu em todos os setores de atividade. Na indústria, nos transportes, no setor agropecuário e no setor comercial. As taxas de crescimento, em relação ao ano de 2006, foram superiores a 6% [2].

Atualmente a maior parte da energia utilizada pela humanidade é oriunda dos chamados combustíveis fósseis, constituída principalmente pelo petróleo e seus derivados, o gás natural e o carvão.

No início da exploração dos combustíveis fósseis, acreditava-se que eles eram ilimitados e o seu impacto no meio ambiente desprezível. Devido ao aumento vertiginoso do seu uso, esses conceitos vêm sendo revistos. A atual matriz energética mundial, sustentada nos combustíveis fósseis, está levando ao aumento da temperatura terrestre através do efeito estufa provocado pelos gases emitidos por sua queima.

O aumento no consumo dos hidrocarbonetos está produzindo alterações no clima em nível planetário, como resultado das emissões dos gases decorrentes da queima desses combustíveis e, em níveis regionais, com as chamadas chuvas ácidas, que provocam danos à flora e à fauna [3].

Os países ricos possuem muito mais recursos para aplicar em sistemas de proteção contra enchentes, sistemas de armazenamento de água e em adaptações na agricultura.

Nos países pobres, onde a cobertura dos seguros é muito limitada, os prejuízos devidos aos desastres naturais decorrentes do aquecimento global podem desencadear a condenação à pobreza por gerações.

Quando furacões, enchentes e secas atingem o mundo desenvolvido, companhias de seguro privadas compensam grande parte das vítimas, conforme Relatório do Desenvolvimento Humano do PNUD-ONU, 2007/2008 [4].

Dois desafios estão postos para a sociedade atual: buscar novas fontes de energia para atender à crescente demanda, e reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa, para afastar os danosos efeitos do aquecimento global.

Para que esses desafios sejam atingidos é necessário alterar a matriz energética mundial, centrada em combustíveis fósseis, migrando para as fontes de energias limpas e renováveis, pois caso contrário, em virtude das mudanças climáticas em andamento, não apenas resultará em danos ao meio ambiente, mas também no aumento das desigualdades sociais.

Apesar de existirem várias alternativas energéticas, algumas delas não estão sendo suficientemente utilizadas, seja por limitações técnicas ou econômicas, e outras apenas porque o seu desenvolvimento ainda é parcial.

Modernamente, o grande estímulo para o desenvolvimento de estudos sobre energia eólica ocorreu na década de 70, do século passado, com a crise de fornecimento de petróleo e o conseqüente aumento no preço do barril, motivado pelas ações da Organização dos Países Exportadores de Petróleo - OPEP e pela guerra árabe-israelense. Por força da crise, o mundo se lançou na busca de outras fontes de energia. Finda a guerra e superada as questões políticas e de fornecimento do produto, o mundo voltou a esquecer as fontes renováveis de energia.

Na atualidade o principal motivador para a renovação do interesse por fontes renováveis de energia se baseia em fatos mais duradouros e nefastos para a humanidade que são o aquecimento global, decorrente do consumo desenfreado dos combustíveis fósseis e a conseqüente emissão de gases do efeito estufa.

No Brasil, mais de 80 % da eletricidade produzida provém da geração hidroelétrica. A partir de 1995, como resultado do crescimento das taxas de juros internacionais e do declínio da capacidade de investimento do Estado, o governo brasileiro iniciou um processo de privatização e liberalização do mercado de eletricidade. Apesar das expectativas geradas, novos investimentos na geração de eletricidade não acompanharam o crescimento do consumo. Uma modesta taxa de precipitação pluvial nos primeiros meses de 2001 causou uma séria crise no fornecimento de eletricidade, em resposta, o governo impôs uma redução compulsória de 20% no consumo de toda a energia demandada no último ano, a partir de abril de 2002 [5].

Outra constatação feita em trabalho apresentado pelo Relatório do Desenvolvimento Humano do PNUD-ONU foi que as nações mais desenvolvidas, apresentam um elevado Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), com um consumo de energia na faixa de 4000 a 9000 kgoe (quilogramas de óleo equivalente - 11,63 kWh) por ano, enquanto nações em desenvolvimento com baixa renda e IDH abaixo de 0,5, consomem menos de 500 kgoe. Constatou-se também que para países com IDH superiores a 0,8, o consumo *per capita* anual de energia atingiu níveis superiores a 1000 kgoe, conforme está apresentado na Figura 1.1.

Dessa forma, pode-se concluir que a energia é um fator crucial para a promoção do desenvolvimento social e econômico de um país. A taxa na qual a energia é consumida normalmente reflete o nível de prosperidade que uma sociedade atingiu.

Apesar de o Brasil situar-se na faixa dos países com um consumo per capita superior a 1000 kgoe, existem grandes disparidades entre o consumo de energia da população de baixa renda (maioria) e a população de alto poder aquisitivo [4].

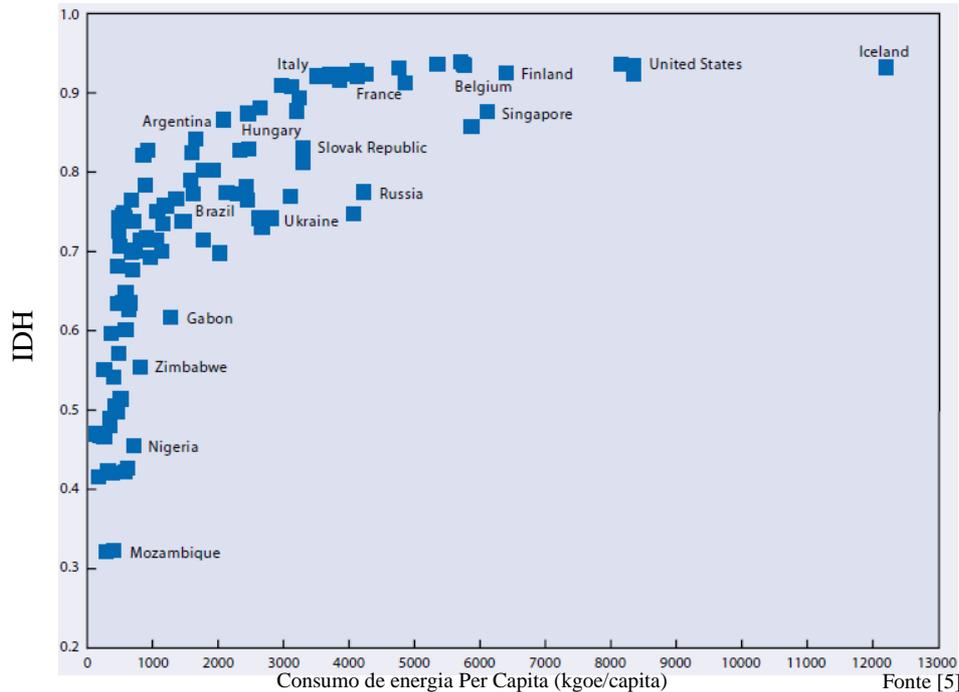


Figura 1.1 - Relação entre o IDH e o consumo per capita de energia – 1999-2000

1.1 – O Uso da Energia Eólica

No Brasil a utilização extensiva e intensiva da energia eólica pode reduzir a dependência da energia elétrica de fonte térmica e conseqüentemente minimizar os riscos de racionamentos decorrentes das cíclicas secas prolongadas, provocadas pelos fenômenos “El Niño” e “La Niña”, visto que as águas dos lagos das hidrelétricas que viriam a ser utilizadas para a geração de energia elétrica permanecerão armazenadas.

As instalações eólicas preservam o local onde estão instaladas em virtude do baixo impacto no ambiente e nas atividades econômicas pré-existentes. Um aerogerador, além do seu custo de instalação, não acrescenta os custos adicionais da aquisição de combustível para a produção de energia elétrica.

O seu combustível é o vento. Ficando o custo da energia elétrica produzida inalterada, exceto pelos relativamente pequenos acréscimos decorrentes dos custos de manutenção, não sofrendo, portanto, os reflexos negativos das turbulências políticas e conjunturais da economia mundial. Um gerador elétrico que utiliza os combustíveis de origem fóssil agrega as incertezas do seu fornecimento e do custo imprevisível de sua aquisição ao valor final da energia produzida.

No caso específico de utilização de pequenos aerogeradores conectados à rede o seu proprietário tem a geração de renda decorrente da substituição da energia elétrica fornecida pelas concessionárias, podendo o excedente produzido ser vendido ou utilizado para substituir o gás de cozinha, com a utilização de fogões e fornos elétricos, dependendo do que for mais vantajoso.

Em um futuro próximo, com o advento de veículos elétricos, a energia elétrica de fonte eólica contribuirá também na substituição dos combustíveis automotivos de origem fóssil.

A utilização da energia eólica para a geração de energia elétrica tem para o meio ambiente, vários aspectos positivos e poucos negativos. De fato, os aspectos positivos superam grandemente os efeitos negativos, estando enquadrada no grupo das energias limpas. A principal característica da energia limpa é sua a baixa ou nenhuma emissão do gás carbônico e do metano na atmosfera. [6].

Os combustíveis fósseis e os de origem nuclear liberam para o meio ambiente energia que estava armazenada há milhões de anos e não mais fazem parte do equilíbrio energético natural da Terra, ao contrário dos aerogeradores, que não adicionam energia ao sistema e simplesmente transformam a energia cinética em energia elétrica

Todas as regiões brasileiras possuem um ou mais potenciais energéticos renováveis, o que abre possibilidade para o seu aproveitamento através de sistemas de geração de energia elétrica de pequena escala, conectado à rede, entre eles, os geradores eólicos, sistemas fotovoltaicos e mini-hidráulicas.

A sua distribuição territorial dispersa em vez de um problema poderá ser considerada como uma vantagem diferencial, se utilizada como um elemento integrante de programas de distribuição de renda e aumento da competitividade dos bens produzidos regionalmente.

A utilização de pequenos aerogeradores para produção de energia elétrica já é largamente utilizado na América do Norte e Europa, como o Reino Unido. Nesses países diversos mecanismos incentivadores do uso desses equipamentos estão em vigor.

No Brasil, apesar do potencial eólico, em especial na região nordeste, não existe nenhum mecanismo incentivador que venha a facilitar a utilização dessa fonte de energia com o uso de pequenos aerogeradores. Procedimentos como regras simplificadas para a conexão desses equipamentos à rede elétrica, a redução em 100% no valor da tarifa de utilização do sistema de distribuição - TUSD e a aplicação da CDE - Conta de Desenvolvimento Energético na utilização dos pequenos aerogeradores por autoprodutores, em muito poderá contribuir para a disseminação desses equipamentos no Brasil.

SEGUNDO CAPÍTULO - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCEITOS BÁSICOS DA ENERGIA EÓLICA

2.1 - Conceitos Básicos

Neste capítulo foi feita uma rápida revisão dos conceitos básicos da energia eólica e de seus fundamentos.

2.1.1 - Vento

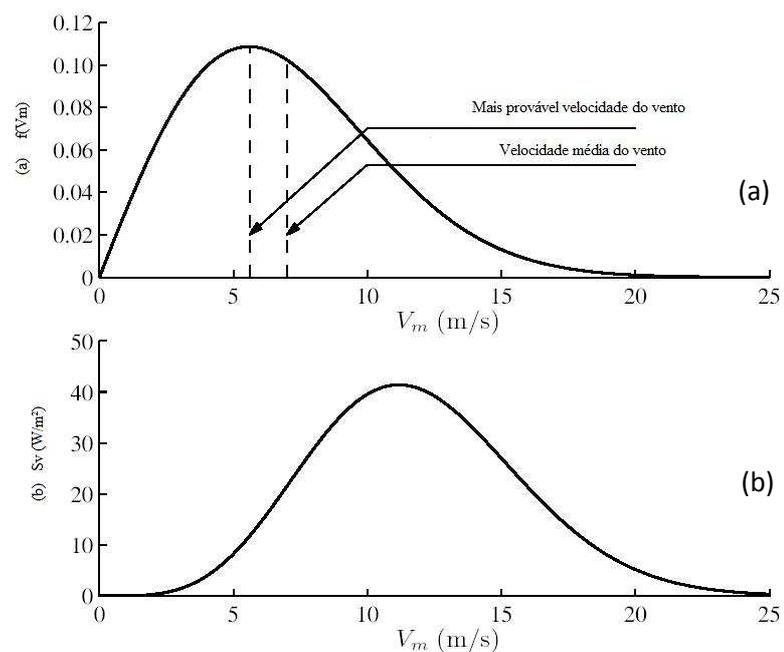
O vento é o deslocamento das massas de ar provocado pelas variações de pressão induzidas pelo aquecimento desigual da superfície terrestre. A energia cinética resultante é a fornecedora primária da energia dos aerogeradores.

2.1.2 – Distribuição de Weibull e Densidade de Energia do Vento

A curva de frequência da velocidade do vento pode ser descrita por várias funções de densidade, a mais comum é a função de Weibull. A função Weibull possui dois parâmetros: c – parâmetro de escala e k – parâmetro de forma [7].

A velocidade média do vento v_m é distribuída segundo Weibull se a sua função densidade de probabilidade é descrita pela equação (2.1).

$$f(v_m) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_m}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v_m}{c}\right)^k\right] \quad k > 0, v_m > 0, \quad (2.1)$$



Fonte:[7]

Figura 2.1- (a) função densidade de probabilidade de Weibull, (b) função densidade de energia.

Ao se multiplicar a energia de cada velocidade do vento pela probabilidade de cada velocidade de vento do gráfico de Weibull encontra-se a distribuição da energia do vento em diferentes velocidades, que é a densidade de energia, S_v , Figura 2.1.

2.1.3 - Coeficiente de Potência e Limite de Betz

O coeficiente de potência (C_p) é definido como a fração da energia do vento que passa pelo rotor do aerogerador e este transforma em trabalho mecânico. O valor máximo teórico do coeficiente de potência, conhecido como Limite de Betz, é igual a $16/27 = 0,593$ [8].

O coeficiente de potência de um rotor varia com a relação entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento, em fluxo livre que incide no rotor (TSR – Tip Speed Rate). Aumentar o coeficiente de potência é uma busca constante nas pesquisas de desenvolvimento tecnológico dos rotores dos aerogeradores, contudo os avanços alcançados apresentam modestos ganhos na potência. Maiores incrementos na potência de saída de um aerogerador são alcançados com o aumento da área varrida pelo rotor, pela localização do aerogerador em locais com maiores velocidades de vento, inclusive com a utilização de torres mais altas para melhor aproveitamento.

Os principais parâmetros determinantes do coeficiente de potência de um rotor são:

- número de pás do rotor;
- distribuição do comprimento da corda ao longo da pá;
- características aerodinâmicas dos aerofólios;
- variação da torção das pás [9].

2.1.4 – Solidez

Solidez (σ) de um aerogerador é definida como sendo a relação entre a área projetada total das pás do rotor e a área varrida pelo rotor, equação (2.2).

$$\sigma = \frac{\text{Área projetada das pás}}{\text{Área varrida pelo rotor}} \quad (2.2)$$

Alto torque e bom desempenho em baixas velocidades são características de rotores de alta solidez.

Os rotores de baixa solidez operam com rendimentos maiores em velocidades elevadas e têm característica de partida pobre.

A solidez pode ser alterada, seja mudando: o número de pás, a corda ou a torção das pás.

Os aerogeradores utilizados para geração de energia elétrica se enquadram nos aerogeradores que utilizam rotores de baixa solidez [10].

A Figura 2.2 apresenta as curvas típicas de desempenho de vários aerogeradores.

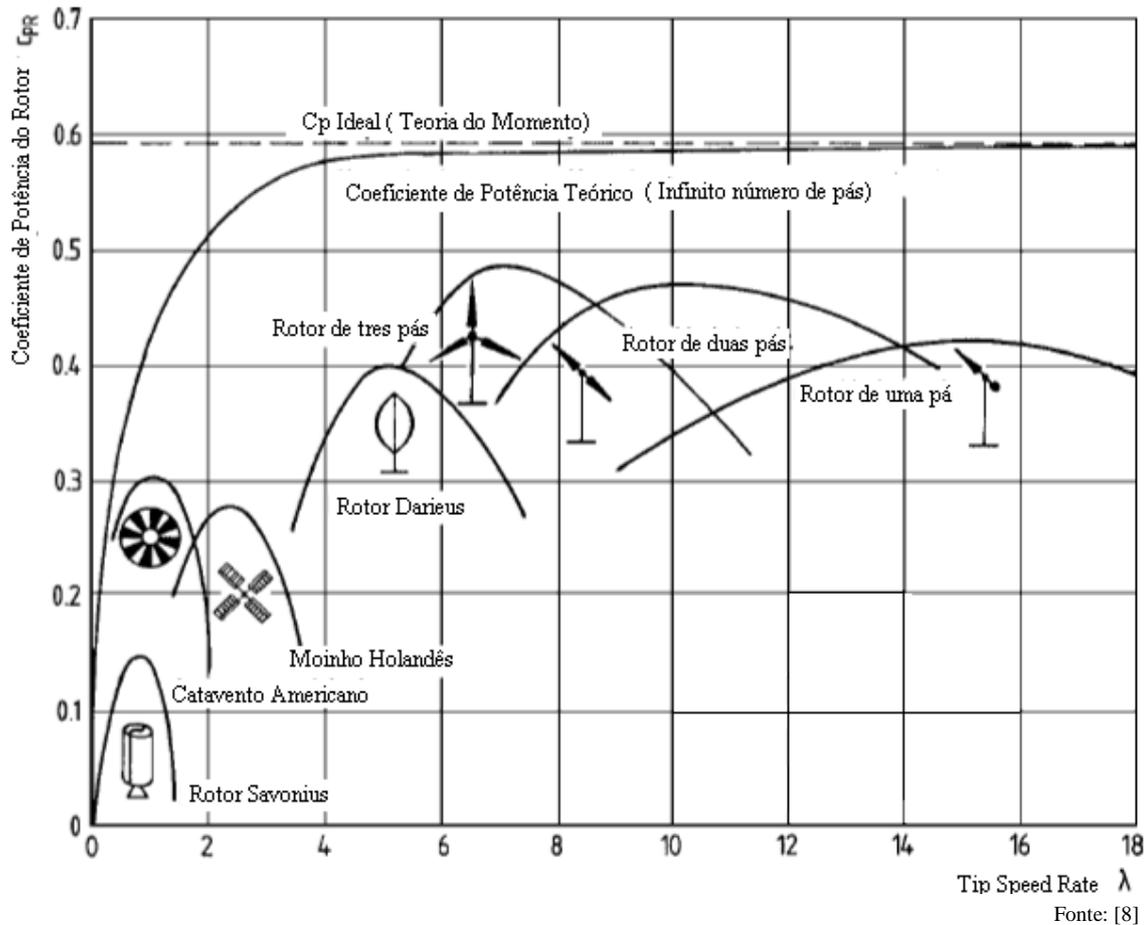


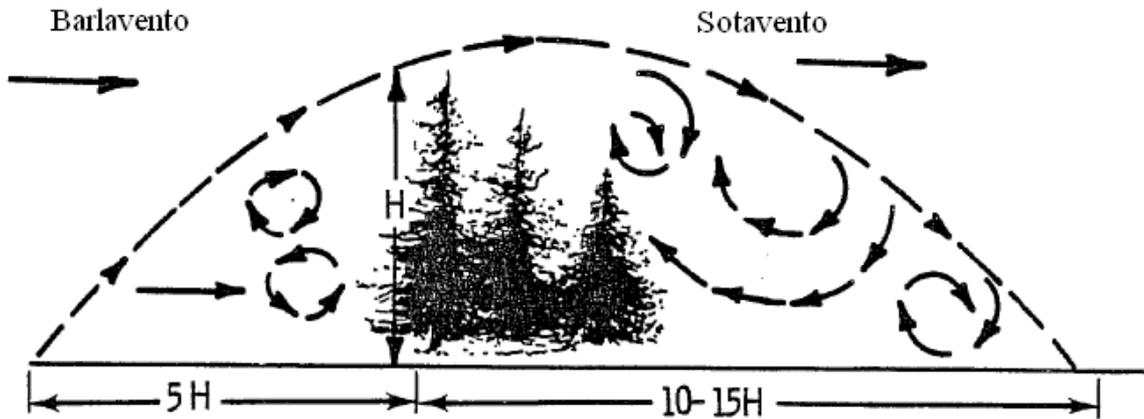
Figura 2.2 – Curva típica de desempenho de rotores eólicos – C_p x TSR

2.15 – Turbulência

O fenômeno da turbulência no fluxo de ventos consiste fisicamente de rápidas mudanças na magnitude da velocidade, ou na direção do vento, ou de ambas, simultaneamente.

Na produção de energia em um pequeno aerogerador, normalmente os efeitos da turbulência são desprezados. A ocorrência da turbulência atmosférica apesar de aumentar a energia cinética total do ar, tende a reduzir a eficiência e a vida útil de um aerogerador no processo de conversão de energia cinética em energia mecânica. Estudos realizados pelo CEDER-CIEMAT indicam que a energia cinética presente na altura do cubo do rotor de um pequeno aerogerador pode variar em até 20%, para o mesmo ambiente sem turbulência, dependendo do nível de turbulência presente no local [10].

A Figura 2.3 exemplifica o efeito dos obstáculos (árvores) na formação da turbulência. H é a altura das árvores.

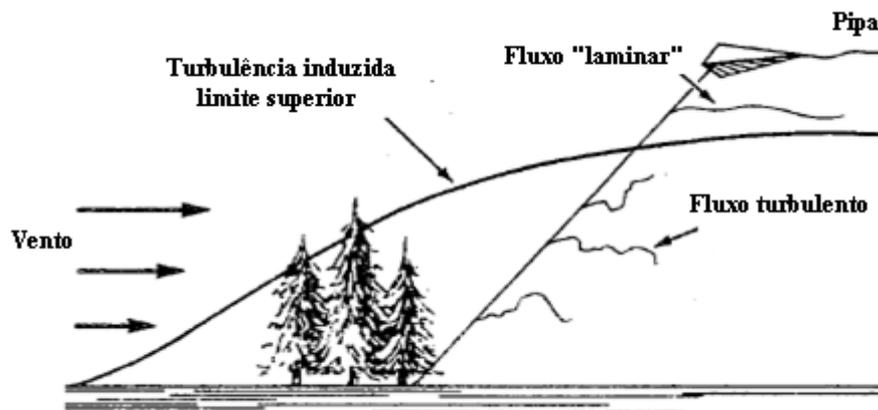


Fonte: [11]

Figura 2.3 – Exemplo esquemático do campo de fluxo turbulento causado por obstáculos.

A maior importância do estudo da turbulência está na sua aplicação para o dimensionamento estrutural e aeroelástico das máquinas eólicas. A turbulência mais perigosa para as máquinas eólicas é a de pequena escala, caracterizada por flutuações rápidas, freqüentemente induzidas pelo vento fluindo sobre uma superfície rugosa [12].

A Figura 2.4 apresenta um método prático de estimar o efeito da turbulência provocada por determinado obstáculo [11].



Fonte: [11]

Figura 2.4 – Método experimental de estimativa da altura da turbulência eólica induzida por árvores.

2.1.6 – Fatores de Capacidade e de Disponibilidade

O fator de capacidade (FC) de um aerogerador é a razão entre a energia produzida em um determinado período (um ano) e aquela produzida caso ele tivesse operado em sua capacidade nominal, conforme a Equação (2.3).

$$FC = \frac{\text{Energia produzida no ano (kWh)}}{\text{Potência nominal do aerogerador (kW)} \times 8760 \text{ h}} \quad (2.3)$$

Outra variante para analisar a capacidade de utilização de um aerogerador é calcular o tempo equivalente na potência nominal de sua produção total de energia em um ano, conforme a equação 2.4.

$$F_{disp} = \frac{\text{Energia anual produzida (kWh)}}{\text{potência nominal do aerogerador (kW)}} \quad (2.4)$$

Os procedimentos de quantificação de trabalho dos equipamentos em sua potência nominal não se configuram como um indicador definitivo, visto que o critério de definição da potência de placa dos aerogeradores não é padronizado universalmente [9].

2.2 - Tipos de Máquinas Eólicas

O aerogerador é uma máquina que retira parte da energia cinética do vento e transforma em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica. Na Figura 2.5 esquematiza-se os principais tipos de máquinas eólicas clássicas.

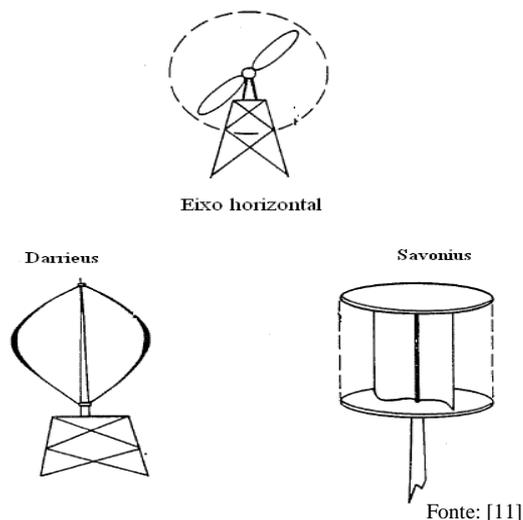


Figura 2.5 – Tipos de máquinas eólicas clássicas.

As máquinas utilizadas para capturar a energia do vento, podem ser classificadas de acordo com os seguintes aspectos:

1 – com relação ao eixo do rotor e a direção do vento, podem ser paralelas ao vento e perpendiculares ao vento;

2 – com relação a sua orientação em relação ao solo, podem ser classificadas em eixo horizontal e eixo vertical;

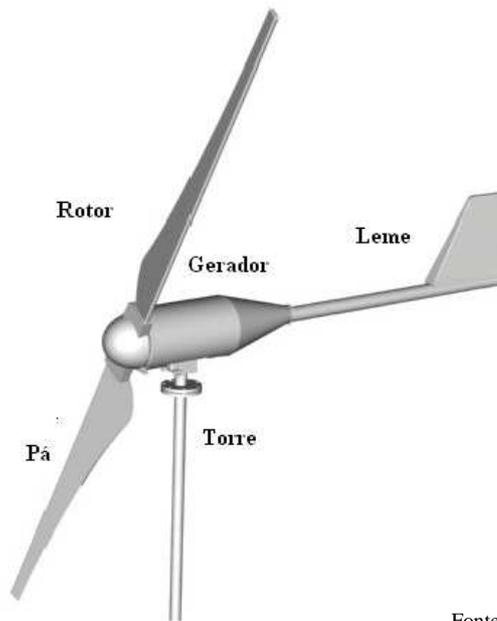
3 – com relação ao fator de propulsão dominante, podem ser os componentes da resultante aerodinâmica de sustentação ou de arrasto. Os modernos aerogeradores de eixo horizontal utilizados para a produção de energia elétrica usam a força de sustentação produzida pelo efeito do formato aerodinâmico das pás, em sua interação com os fluxos dos ventos;

4 – com relação ao tamanho e/ou potencia nominal extraída, é usual classificar os aerogeradores em micro, pequenos, médios e grandes, dependendo do diâmetro do seu rotor ou da sua potência.

O equipamento tratado neste trabalho é o aerogerador de pequeno porte, com rotor perpendicular ao vento, de eixo horizontal com relação ao solo, e que utiliza o efeito aerodinâmico da força de sustentação para a extração da energia do vento.

2.3 - Pequeno Aerogerador

Os aerogeradores, dependendo da sua classificação, podem ter diferentes componentes. Os pequenos aerogeradores de eixo horizontal basicamente são compostos de rotor, leme ou rabeta direcionadora, gerador ou alternador elétrico, torre e inversores elétricos. A Figura 2.6, mostra um típico pequeno aerogerador de eixo horizontal e seus componentes.



Fonte: [web]

Figura 2.6 – Componentes de um aerogerador de pequeno porte.

2.3.1 – Rotor

O rotor é o principal elemento de uma máquina eólica, e tem como função transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de eixo rotativo. O rotor é formado do cubo e pás.

Para a utilização como máquina de produção de energia elétrica, os aerogeradores têm normalmente duas ou três pás, com perfil aerodinâmico, podendo elas ser construídas em madeira, fibra de vidro e outros compósitos. O cubo é o outro componente do rotor, onde são fixadas as pás e que transfere a energia para o eixo do gerador elétrico. A Figura 2.7, apresenta os detalhes da pá e do cubo de um pequeno aerogerador.

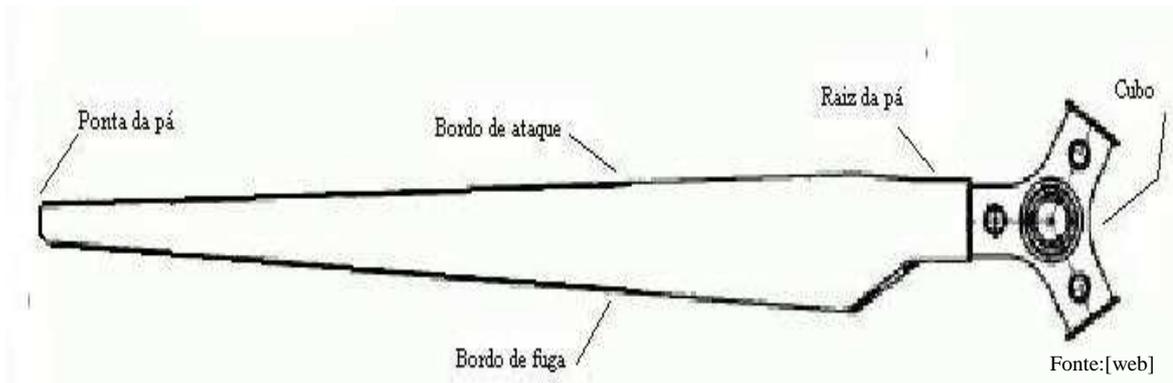
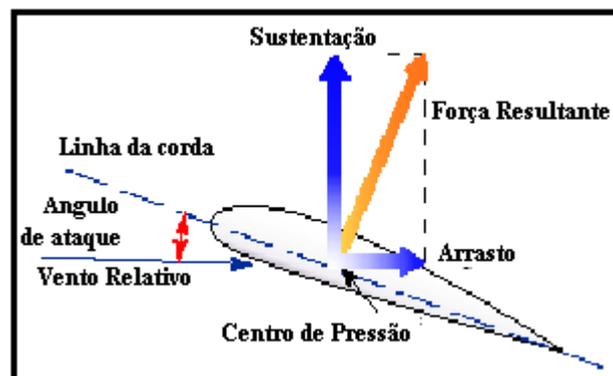


Figura 2.7 - Detalhes da pá e do cubo de pequeno aerogerador.

As pás dos aerogeradores têm perfis aerodinâmicos variados, de forma a aumentar a sua eficiência, na retirada da energia em determinada faixa de velocidade do vento. Elas podem ser constituídas de um único ou uma combinação de vários perfis.

A Figura 2.8 mostra as forças aerodinâmicas que atuam sobre o perfil da pá de um aerogerador.



Fonte:[web]

Figura 2.8 - Perfil da pá, alguns elementos e forças aerodinâmicas de um aerogerador.

2.3.2 - Leme direcionador

O leme tem a função de manter o plano do rotor sempre perpendicular a direção do vento, de modo a maximizar a retirada da sua energia. A maioria dos pequenos aerogeradores utiliza apenas o leme para essa função.

2.3.3 - Torre

A torre é a parte do sistema de geração eólica que eleva o aerogerador para uma altura em que a velocidade do vento é maior e fica menos perturbada pelos efeitos do atrito viscoso e turbulência que ocorrem junto ao solo. A altura da torre é limitada pela relação entre o seu custo e pelo acréscimo da energia obtido com a elevação do rotor.

As torres normalmente são construídas em metal (aço). As torres de aço podem ser tubulares ou treliçadas. As torres utilizadas nos pequenos aerogeradores podem ser estaiadas.

O estaiamento reduz o material utilizado na construção da torre, porém exige uma maior área disponível para a instalação do aerogerador.

Os critérios para a escolha entre as torres tubulares ou treliçadas, geralmente ficam limitados ao custo ou ao impacto visual. Em áreas urbanas, em função da limitação de espaço, o estaiamento não é recomendado.

A opção pelas torres de concreto está direcionada para os grandes aerogeradores e é definida por seu menor custo e a possibilidade de construção no local da instalação. Hoje o seu tamanho está limitado à quantidade de aço usado na armação que, para as torres das grandes turbinas, já está próxima da quantidade de aço de uma torre treliçada de mesmo porte.

Importância da torre para os projetos eólicos:

- a) A velocidade do vento aumenta com a altura;
- b) Pequenos acréscimos na velocidade do vento refletem em grande aumento na potência extraída;
- c) Torres altas geralmente são necessárias para se evitar os efeitos de obstáculos em volta do aerogerador.

A potência disponível no vento varia com o cubo da sua velocidade. A variação da velocidade do vento com a altura varia segundo função matemática logarítmica e é dependente também da rugosidade do solo, que é uma característica do local de instalação. O atrito do vento com a superfície terrestre tem como consequência o seu retardamento. O efeito da força de atrito sobre o vento vai sendo reduzido até praticamente se anular a uma altura de aproximadamente 2000 metros [13].

A mais baixa camada da atmosfera é conhecida como camada superficial e se estende até uma altura de 100 metros. Nesta camada, os ventos são frenados pelas forças friccionais e obstáculos alterando não apenas sua velocidade, mas também a sua direção [7].

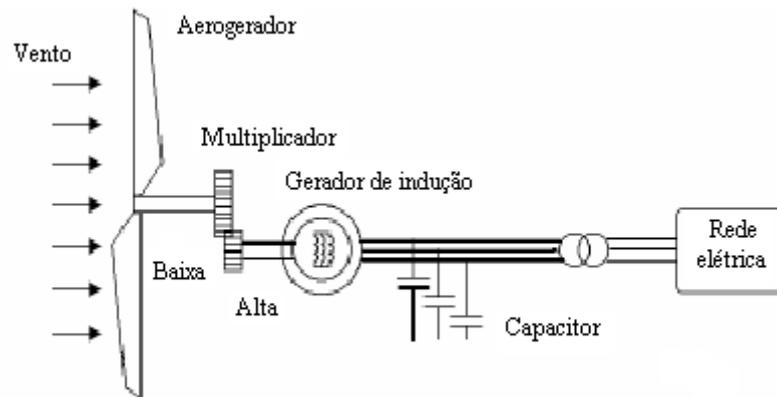
2.3.4 - Geradores Elétricos e Alternadores

A conversão da potência mecânica no eixo do rotor de um aerogerador para a potência elétrica é feita por um dos seguintes tipos de máquinas elétricas: máquinas síncronas, máquinas de indução e máquinas de corrente contínua.

O princípio de funcionamento dessas máquinas é o efeito eletromagnético. A mesma máquina pode ser usada como um motor, usando a energia elétrica e transformando-a em energia mecânica ou, como gerador, convertendo a energia mecânica em energia elétrica [14].

2.3.4.1 - Máquinas de Indução de Rotor Gaiola de Esquilo

Máquina de indução de rotor gaiola de esquilo, com sua ligação a rede de forma direta. Em virtude da variação da velocidade admissível da máquina em relação à velocidade de sincronismo ser muito pequena, na prática, esta máquina comporta-se como tendo velocidade constante, independente da velocidade do vento. Tais equipamentos são sempre equipados com bancos de capacitores para corrigir o fator de potência, ver esquematização na Figura 2.9.

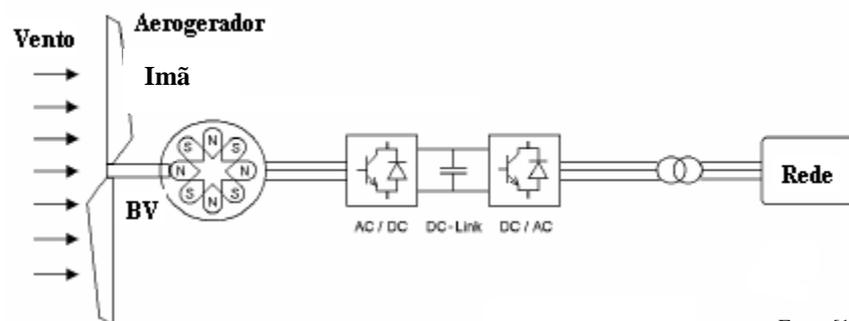


Fonte:[15]

Figura 2.9 - Esquematização de um gerador de indução gaiola de esquilo.

2.3.4.2 - Geradores Síncronos

A máquina síncrona é ligada à rede de distribuição através de um sistema de conversão CA-CC-CA, já que a frequência elétrica da energia produzida pela máquina é diferente da frequência elétrica da rede. Esse sistema tem a vantagem de dispensar o uso dos multiplicadores de velocidade, conforme Figura 2.10.



Fonte:[15]

Figura 2.10 – Esquematização de uma máquina síncrona.

Os pequenos aerogeradores atualmente utilizam geradores síncronos com ímãs permanentes.

2.4 - Inversores

São equipamentos eletrônicos que possuem a função de converter a energia com a tensão e frequência elétrica variável produzida pelo aerogerador para corrente contínua e então para a tensão e frequência adequadas para uso de equipamentos, ou para a tensão e frequência da rede elétrica.

TERCEIRO CAPITULO - O MEIO AMBIENTE E A UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA

3.1 - Uso de Aerogeradores

A utilização da energia eólica para a geração de energia elétrica apresenta vários aspectos positivos, e alguns negativos, ao meio ambiente, porém o fato dos aspectos positivos superarem grandemente os efeitos negativos faz com que esta alternativa energética pertença ao grupo das energias limpas. A energia eólica também não produz dejetos poluentes nem radiações ionizantes [10].

3.1.1 - Aspectos positivos

Os benefícios ambientais gerados pelo uso da energia eólica são sentidos tanto no local de sua instalação, como a nível regional e global. O uso da energia eólica, ao substituir a energia de origem fóssil, melhora a qualidade do ar local, regionalmente diminui os efeitos da chuva ácida, e reduz a emissão dos gases que provocam o efeito estufa.

A maior vantagem da energia eólica é ser um recurso renovável, e, ao contrário dos combustíveis de origem fóssil e nuclear não adiciona energia ao ambiente, nem produz gases que provocam o efeito estufa e a chuva ácida.

Dentre os aspectos positivos, o que merece um esclarecimento é o que diz respeito à adição de energia ao sistema.

Os combustíveis fósseis e os de origem nuclear liberam para o ambiente a energia que estava armazenada há milhões de anos e não mais faziam parte do equilíbrio energético natural da Terra, ao contrário, os aerogeradores não adicionam energia ao ambiente e simplesmente consomem e transformam a energia cinética do vento em energia elétrica.

O uso de pequenos aerogeradores atende a filosofia da geração descentralizada, que é uma forma estratégica de se instalar pequenas unidades geradoras próximas aos consumidores. Estas unidades geradoras reduzem as perdas no transporte de energia até o consumidor e proporcionam uma maior confiabilidade ao sistema de distribuição de energia elétrica.

3.1.2 - Aspectos Negativos

Como aspectos negativos podem ser citados o impacto sobre a fauna, o visual e as perturbações sonoras.

3.2 - Impacto sobre a Fauna

O impacto sobre a fauna atinge basicamente a população de pássaros, insetos e morcegos. Estima-se que cerca de um bilhão de pássaros são mortos anualmente, como

consequência da sua interação com estruturas construídas pelo homem. Desse total, algo em torno de 20.000 a 37.000 pássaros, morreram em 2003, como consequência de contato com as instalações de energia eólica: choque com aerogeradores, eletrocutadas nas rede de transmissão e colisão com os cabos elétricos, entre outros. Para cada 10.000 pássaros mortos pela atividade humana, menos de uma morte se deve aos aerogeradores [16].

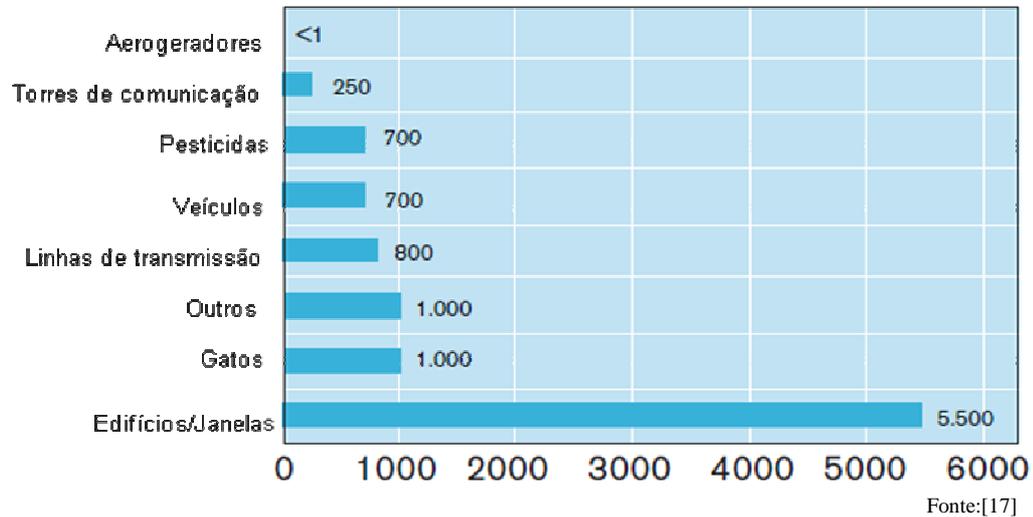


Figura 3.1 - Causas de mortalidade entre pássaros.

O impacto sobre os morcegos depende das proximidades de suas colônias com os parques eólicos e ainda faltam mais estudos conclusivos sobre este tema.

Diversos estudos estão atualmente sendo desenvolvidos, principalmente no estado da Califórnia – EUA, para se levantar dados mais precisos e criar procedimentos e equipamentos para a redução dessa mortandade entre pássaros e morcegos [18].

O cuidado que deve se tomar quando de uma instalação de um parque eólico é evitar a sua localização dentro dos corredores de migrações das aves.

Para uma determinada potência instalada, menos aerogeradores de maior potência deverão ser preferíveis, à instalação de mais aerogeradores de menor potência, de forma a reduzir o número de grandes estruturas nos parques eólicos.

Esses estudos foram realizados para aerogeradores de grande porte em parques eólicos. Relatos de acidentes de pássaros com pequenos aerogeradores de pequeno porte são raros, levando-se a conclusão que os pequenos aerogeradores têm efeitos desprezíveis sobre a fauna.

3.3 - Perturbações Sonoras

O som é o efeito do movimento ondulatório em gases, líquido e sólidos. Ele pode ser causado por numerosos mecanismos, e é sempre associado à rápidas flutuações de pressão em baixa escala que produzem sensações ao ouvido humano [19].

O ruído é definido como um som indesejável. Ele é o mais importante limitador para a localização de um pequeno aerogerador. Pequenos aerogeradores são com frequência usados para eletrificação residencial. Estes sistemas podem ser conectados à rede ou isolados.

Devido à proximidade da atividade humana, sua aplicação pode resultar em reclamações devido ao ruído gerado. Aerogeradores geram ruídos de duas origens: mecânica e aerodinâmica.

3.3.1 - Ruído Mecânico

Os ruídos de origem mecânica em grandes aerogeradores são provenientes do multiplicador de velocidade, do gerador elétrico, dos motores de direcionamento, dos ventiladores do sistema de resfriamento e dos equipamentos auxiliares.

Aerogeradores estão sendo projetados visando minimizar os sons mecânicos. Isto inclui a utilização de dentes de engrenagens polidos, uso de sistema de resfriamento com ventiladores de baixa velocidade, instalações dos equipamentos que produzem ruídos na gôndola em vez de no solo. Utilização de abafadores e isoladores de vibrações evita a sua propagação ao restante da estrutura [20].

Os aerogeradores de pequeno porte, principalmente devido a sua maior velocidade de operação, não utilizam os multiplicadores de velocidades e nem sistemas de resfriamento e equipamentos hidráulicos de direcionamento do rotor, que contribuem fortemente com o ruído mecânico. A sua fonte de ruído mecânico é o de seu gerador elétrico.

3.3.2 - Ruído Aerodinâmico

O principal ruído de origem aerodinâmica é produzido pelo fluxo do ar em torno das pás e em menor grau em torno da torre e na estrutura de direcionamento do rotor. O outro é produzido pela turbulência. Os ruídos de origem aerodinâmica geralmente crescem com a velocidade do rotor.

O nível médio de ruído para um pequeno aerogerador é em torno de 50-57 dB(A), medido no cubo do rotor. É possível escutar o ruído de um pequeno aerogerador a algumas centenas de metros, dependendo da direção, da intensidade e outros fatores. Com o aumento da velocidade do vento, o próprio ruído do vento supera o do aerogerador. Normalmente o ruído produzido pelo aerogerador é superado pelo ruído produzido pelo ambiente em que ele está instalado. A Figura 3.2 apresenta uma escala sonora em várias atividades humanas.

Estudos realizados em setembro de 2008, em Warwickshire, condado na região central da Inglaterra, onde foram estudadas 29 pequenos aerogeradores instalados no teto (*roof on top*) de edificações, foram recebidas três reclamações relativas ao ruído produzido pelos equipamentos. Dessas três reclamações, dois aerogeradores tinham sido instalados em apartamentos residenciais e um em um lar geriátrico. O desconforto ocorreu no ruído durante o período noturno. A solução encontrada foi a instalação de timer que regulam a operação do aerogerador de forma que eles operem apenas durante o dia [21].



Figura 3.2 - Escala sonora e o pequeno aerogerador.

3.4 - Impacto Visual

Aerogeradores são naturalmente visíveis, visto que eles têm que ser instalados em torres altas, para trabalharem com ventos mais fortes e também em função do movimento de suas pás. Desde que aerogeradores são visíveis em qualquer situação recomenda-se a utilização de cores que os integrem a paisagem.

Os pequenos aerogeradores, em virtude do seu pequeno diâmetro, têm baixo impacto visual, e normalmente se integram à paisagem. O impacto visual de um aerogerador normalmente não é superior às grandes antenas residenciais parabólicas de recepção de televisão por satélite e às torres e antenas de transmissão de telefonia móvel.

3.5 - Interferências eletromagnéticas

Os pequenos aerogeradores não provocam interferências em aparelhos eletrônicos visto que as pás dos modernos pequenos aerogeradores são fabricadas em madeira, fibra de vidro e outros compostos não metálicos.

QUARTO CAPÍTULO – AEROGERADORES E A REDE ELÉTRICA

Os aerogeradores conectados à rede elétrica afetam a qualidade da energia distribuída, a qual depende da interação entre a rede e o aerogerador.

4.1 – A Qualidade da Energia Elétrica

Uma energia elétrica de qualidade é a que tem uma tensão constante em seu valor nominal, e tensão e correntes senoidais com sua amplitude e frequência constantes. A qualidade da energia pode ser expressa em termos de características físicas e propriedades da eletricidade. É comumente descrita em termos de tensão, frequência e interrupções. A qualidade da tensão deve atender às exigências de padrões nacionais e internacionais. Nesses padrões os distúrbios das tensões são subdivididos em variação de tensão, cintilamento, transientes e distorções harmônicas, conforme Figura 4.1.

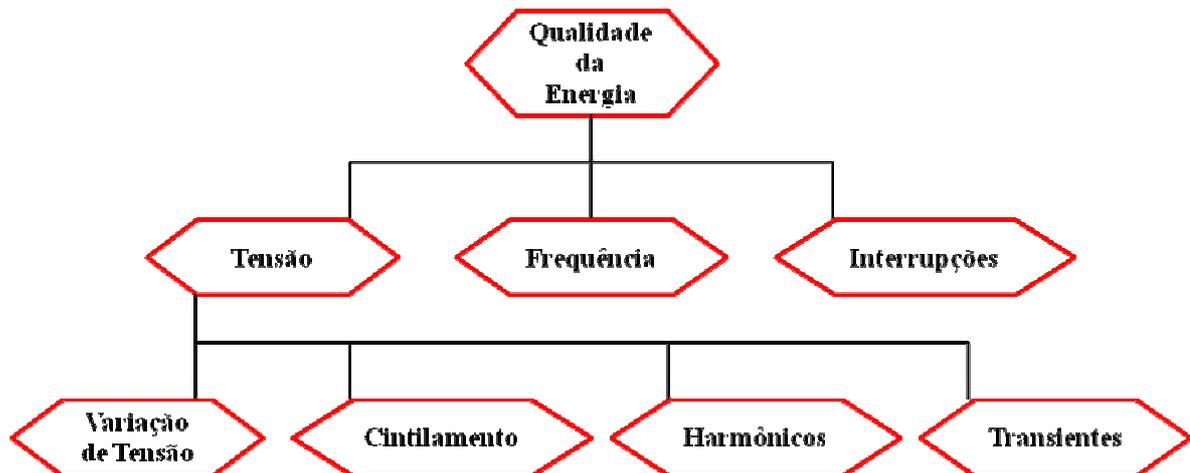


Figura 4.1 – Classificação de diferentes fenômenos na qualidade da energia.

4.1.1 – Tensão

As perturbações na qualidade da energia elétrica motivadas pela tensão são: a sua variação, o cintilamento e os harmônicos e transientes.

4.1.1.1 – A Variação na Tensão

A variação na tensão pode ser definida como as mudanças no valor eficaz da tensão que ocorre em um espaço de tempo, de um minuto ou mais. Padrões nacionais frequentemente permitem variações na tensão nominal, em um período mais extenso, de 24 horas. Normalmente é permitida uma variação na tensão no terminal do usuário não superior a 10%, da tensão elétrica nominal.

As variações de tensão na rede elétrica são causadas principalmente pelas variações de carga na produção de energia. Quando um aerogerador é conectado à rede, as variações de tensão também emanam da energia produzida por ele. A produção da energia pelo aerogerador pode variar largamente, e não apenas devido às variações no vento. Ela pode momentaneamente ir da produção total para uma produção nula no caso eventual de uma parada de emergência ou em caso de partida sob ventos fortes. Todos os tipos de aerogeradores causam variações na tensão elétrica da rede.

4.1.1.2 – Cintilamento (*Flicker*)

O cintilamento (*flicker*) é o efeito visual causado em lâmpadas incandescentes pela flutuação de tensão. Na frequência de 8,8 Hz, o olho humano apresenta sua máxima sensibilidade, sendo capaz de identificar variações na tensão de 0,1%. O cintilamento é uma forma antiga de quantificar as flutuações de tensão elétrica [23].

O cintilamento produzido por aerogeradores conectados a rede elétrica tem sido objeto de várias investigações. Ele ocorre em dois diferentes modos de operação: operação contínua e operações de comutação.

O cintilamento produzido durante a operação contínua é causado pelas flutuações de energia. As flutuações de energia são decorrentes principalmente das variações na velocidade do vento, do efeito da sombra da torre e de características mecânicas do aerogerador.

Cintilamento devido a operações de comutação são provocados principalmente pelo conectar e desconectar o aerogerador na rede elétrica. As mudanças na produção de energia dos aerogeradores irão causar variações na tensão elétrica.

4.1.1.3 – Distorção Harmônicos

Harmônicos ou distorção harmônica é a presença de componentes na tensão ou na corrente com frequência múltiplas da frequência nominal do sistema elétrico. Cargas não lineares, retificadores e inversores em motores são algumas fontes que produzem harmônicos.

Harmônicos são componentes com frequências múltiplas da frequência nominal da rede elétrica, isto é, 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, etc. Inter-harmônicos são definidos como as componentes que apresentam frequências localizadas entre os harmônicos.

Aerogeradores de velocidade fixa não causam harmônicos significativos e nem inter-harmônicos. Para aerogeradores de velocidade variável equipados com conversores a emissão de harmônicos tem que atender a padrões nacionais e internacionais.

4.1.1.4 – Transitórios Elétricos

Transitórios elétricos costumam ocorrer principalmente durante a conexão e desconexão de aerogeradores de velocidade fixa. Caracteriza-se por correntes elevadas e variação de tensão elétrica.

4.1.2 – Frequência

A frequência de grandes sistemas elétricos é normalmente muito estável, e conseqüentemente, sua variação não é um problema. A produção intermitente de energia de um aerogerador, em grandes redes, é compensada por outras unidades de produção [24].

4.1.3 – Interrupções

Um aerogerador, normalmente, não causa qualquer interrupção em uma rede de alta tensão. Para o caso de operação de um aerogerador conectado a rede, a interrupção não é considerada um problema.

4.1.4 – Padrão Nacional

A Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica, nos documentos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, normatiza e padroniza as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica e leva em consideração as seguintes características físicas para a avaliação da qualidade da energia elétrica, seja em regime permanente ou transitório: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência [25].

4.2 – Ilhamento

O ilhamento ocorre quando uma unidade geradora continua produzindo energia e injetando na rede, mesmo quando esta rede for desligada deliberadamente ou acidentalmente.

As concessionárias utilizam relés e/ou chaves protetoras para evitar que o ilhamento ocorra. Os mesmos dispositivos são utilizados nos circuitos elétricos que liga o aerogerador à rede elétrica. Existem circuitos eletrônicos capazes de “monitorar” a rede e desconectar o gerador dela, caso ocorra alguma falha de operação.

Na eventual falta no fornecimento de energia elétrica por parte da concessionária de energia, os pequenos aerogeradores conectados à rede são projetados para detectar a falta de energia elétrica e desligar-se de forma que nenhuma energia produzida pelo aerogerador será enviada para a rede de distribuição, evitando risco de choque elétrico para quem esteja fazendo a sua manutenção.

4.3 – Sistemas Isolados

O aerogerador utilizado na versão isolado trabalha com inversores isolados (*stand-alone*), também conhecidos como “*off-grid inverters*” que convertem a corrente contínua estocada em baterias para uma corrente alternada, com características tais que possa ser usada pelos equipamentos. Geralmente recebe corrente contínua fornecida em uma tensão determinada, pelo banco de baterias, normalmente múltiplo de 6 V e converte para corrente alternada. Seu uso é limitado a pequenos aerogeradores devido ao alto custo das baterias.

Os inversores podem ser de onda senoidal modificada conhecida por termos como “*pseudo-sine wave*”, “*modified square wave*”, “*near sine wave*” ou “*stepped sine wave*” que oferecem algo muito próximo a uma onda senoidal completa, ou os inversores de onda

senoidal completa (*pure sine wave*), normalmente, por serem mais caros, são utilizados para equipamentos mais exigentes, em termos de precisão.

4.4 – Aerogeradores e Conexão à Rede Elétrica.

Utilizam-se três configurações para conectar pequenos aerogeradores à rede elétrica, conforme ilustrado na Figura 4.2.

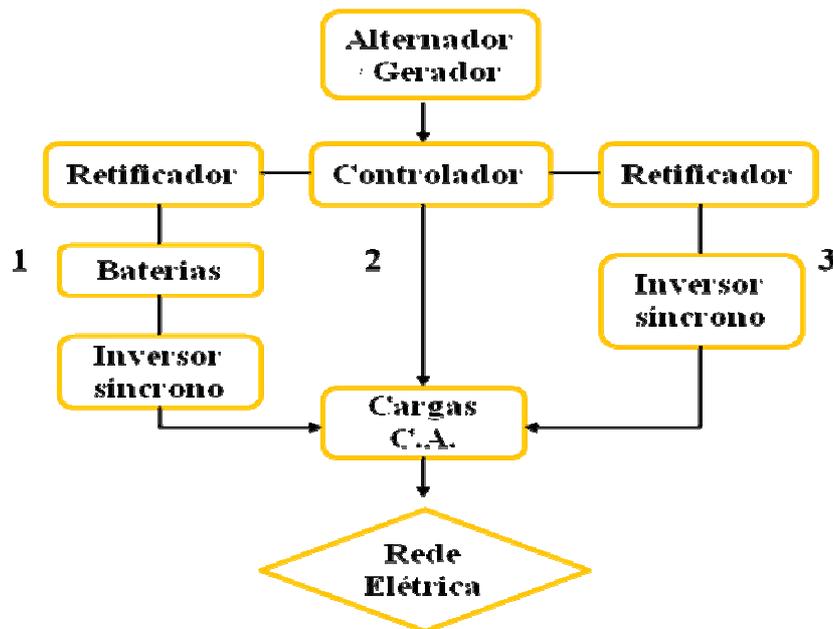


Figura 4.2 – Configurações para pequenos aerogeradores (1, 2, 3)

A primeira configuração (inversor auto comutado), devido aos seus próprios osciladores não necessita de uma referência da rede elétrica para manter a sincronização. Quando vinculado a uma bateria, ele pode tornar-se parte de um sistema de suprimento ininterrupto de energia, que é importante para o caso de supressão no fornecimento por parte da concessionária.

Na segunda configuração, aerogeradores, com geradores de indução, em velocidade constante, produzem corrente alternada, nos padrões da rede elétrica, sem a necessidade do uso de inversores. A energia produzida pelo gerador de indução é regulada pela rede elétrica da concessionária, caso haja uma queda no fornecimento de energia elétrica, o aerogerador não irá produzir energia elétrica.

Na terceira configuração, a energia produzida pelo aerogerador, seja através de gerador a ímã permanente ou de um gerador síncrono de campo bobinado, terá tensão variável e frequência variável em corrente alternada, geralmente trifásica. A energia elétrica produzida deverá ser condicionada para os padrões determinados através de um inversor antes de alimentar a rede elétrica da concessionária.

4.4.1 – Inversores para Conexão a Rede Elétrica

Dois tipos de inversores são comercialmente disponíveis, comutado pela rede e auto comutados.

O comutado pela rede, devido a seu tipo de osciladores, precisa usar como referência os padrões da rede elétrica para fazer a sincronização. Os inversores comutados pela rede geralmente não são capazes de operar independentemente da corrente alternada suprida pela rede elétrica.

Os inversores de comutação forçada ou auto comutados são capazes de suprir a falta da energia, independente da eletricidade suprida pela rede elétrica. Qualquer inversor para ser interconectado com a rede elétrica da concessionária, deverá ser especificamente projetado para esse propósito [25].

A energia elétrica convertida deve atender aos padrões da rede elétrica. Para que a energia seja idêntica à fornecida pela rede elétrica, os inversores devem ser do tipo de ondas senoidais puras (*pure sine wave*) e atender às tolerâncias determinadas pelas instituições reguladoras. Na Tabela 4.1 está apresentado um exemplo das principais características técnicas de um inversor síncrono [26].

Tabela 4.1 – Exemplo de características típicas de um conversor síncrono.

Interconexão a Rede, Linha Comutado, Inversor Síncrono	
Potência de Pico para determinado Alternador: 10 kW até 20 kw = 25 kVA	
Entrada	0 - 180 VAC, 3 fases
Saida	208 -250 VAC, 50 or 60 Hz saida monofásica
Barramento DC	0 - 210 VDC, Potência Transferida em 40 VDC
Proteção Retroalimentação	
Sobre/Sub Tensão	+/- 5%
Sobre/Sub Frequência	+/- 1%
Fator de Potência	0.95 @ plena carga
Distorção Harmônica de Tensão	< 5% @ plena carga
Eficiência	95%

4.5 – Integração de Aerogeradores à Rede Elétrica

A conexão de aerogeradores à rede elétrica provoca poucos impactos na qualidade da energia elétrica, quando a participação da energia produzida pelos aerogeradores representa menos que 15% da capacidade total do sistema. Em muitas situações, os aerogeradores melhoram o desempenho do sistema [27].

QUINTO CAPÍTULO – RECURSO ENERGÉTICO DISPONÍVEL

5.1 - Circulação Geral da Atmosfera

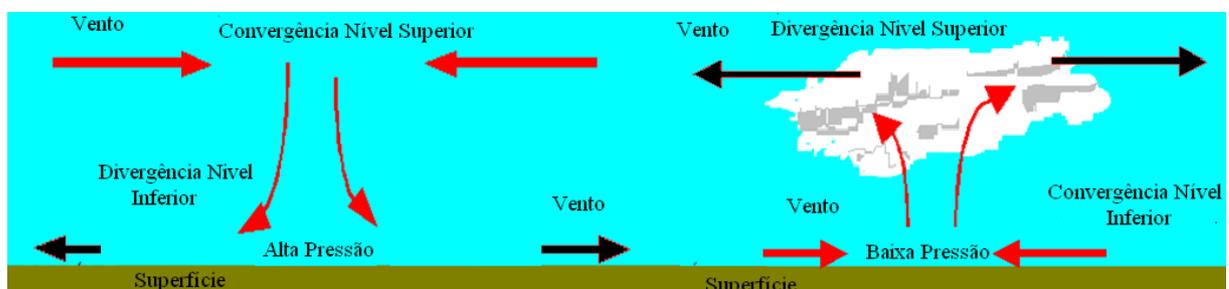
A principal fonte de energia da Terra é a radiação solar. O ângulo de incidência dos raios solares que atingem determinado ponto da Terra varia ao longo do dia, devido ao movimento de rotação da Terra e ao longo do ano, ao seu movimento de translação.

Do total da energia solar que alcança a atmosfera terrestre, uma parcela significativa é refletida pela atmosfera em forma de energia radiante (ondas curtas) e outra parcela atinge a superfície do planeta. Essa parcela que é absorvida pela superfície é a única fonte (desconsiderando-se a de origem geotérmica) de aquecimento da superfície do planeta e ocorre apenas durante o período de luz solar, ao passo que o planeta está sujeito a resfriamento durante 24 horas por dia, emitindo ondas longas [28].

O aquecimento da Terra é diferente para cada região, em função da latitude e época do ano, por outro lado todas as regiões emitem, durante as 24 horas, ondas longas perdendo energia, e se resfriando. As regiões tropicais têm saldo positivo de energia e as altas latitudes têm saldo negativo de energia. É esse aquecimento desigual da Terra que resulta na formação dos ventos e das associadas correntes marítimas [29].

Na atmosfera, a tendência natural é o ar mais frio, ou seja, mais denso, se posicionar abaixo do ar mais quente, ou seja, menos denso. Essa tendência pode ser influenciada pelos gradientes de temperatura e pressão, bem como pela convergência em baixos níveis e divergência em altos níveis, entre outros fatores. Sempre que numa área, com ar instável, se observa um movimento ascendente do ar, em outra região próxima, estará ocorrendo um movimento descendente do ar [30].

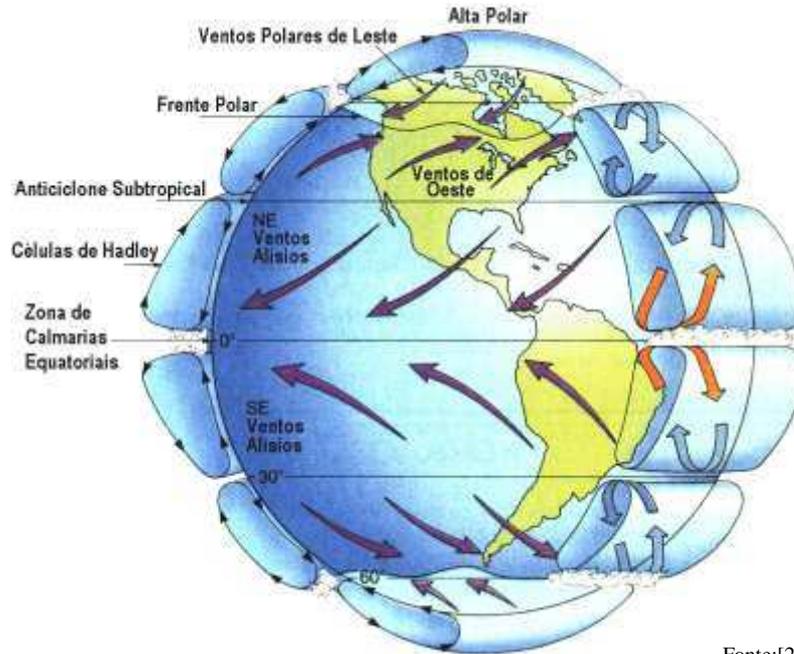
O desencadeamento da circulação direta é provocado pelo aquecimento da superfície, refletindo no aumento da temperatura do ar em baixos níveis, provocando a instabilidade atmosférica. Sempre que a camada de ar inferior fica mais quente que o ar superior, o ar menos denso sobe e o ar mais denso desce, conforme Figura 5.1.



Fonte:[web]

Figura 5.1 - Esquema das correntes de ar ascendentes e descendentes.

Na busca do equilíbrio térmico do planeta se processa o transporte de energia, nas camadas superiores da atmosfera, das regiões tropicais para as regiões de médias e altas latitudes por meio da circulação geral da atmosfera e pelas correntes oceânicas, conforme Figura 5.2 [29].



Fonte:[29]

Figura 5.2 - Distribuição do vento em baixos níveis da atmosfera.

Nos baixos níveis da atmosfera, em escala planetária, as regiões nas latitudes entre 30°N e 30°S são servidas pelos ventos alísios. Entre o equador e 30°S são predominantes os ventos alísios de SE e entre o equador e 30°N são os ventos alísios de NE, Figura 5.2.

As latitudes entre 30°N e 60°N e entre 30°S e 60°S são servidas pelos ventos predominantes de Oeste. Nas altas latitudes entre 60°N e o polo norte 60°S e o polo sul os ventos são os polares de leste [31].

Para o levantamento das disponibilidades energéticas dos ventos aplicáveis no campo da energia eólica, no quadro tecnológico atual, o interesse fica restrito aos ventos em baixas altitudes.

O fluxo do ar acima do terreno é retardado pela resistência friccional oferecida por sua superfície (efeito da camada limite). Esta resistência é caracterizada pela classe de rugosidade de sua superfície ou devido à vegetação, construções e outras estruturas instaladas acima do solo, e é quantificada pelo parâmetro (Z_{or}) [32].

Dois tipos de leis de perfis do vento são freqüentemente usados para a extrapolação do perfil vertical das velocidades do vento na camada superficial da atmosfera: o teoricamente derivado do perfil logarítmico e o empírico da lei da potência, que devido à sua simplicidade, é largamente usado para os propósitos da energia eólica [33]. A Equação (5.1) é um dos modelos utilizados para a extrapolação vertical de velocidade do vento, que permite o cálculo da sua variação, em relação à altura de referência ou de medida (Z_r).

$$v_z = v_{(Z_r)} \left(\frac{\ln \frac{Z}{Z_{or}}}{\ln \frac{Z_r}{Z_{or}}} \right) \quad (5.1)$$

onde v_z é a velocidade do vento na altura Z que se deseja encontrar, $v_{(Z_r)}$ é a velocidade disponibilizada pelo sensor na altura de referência e Z_{or} é a rugosidade característica do local.

5.2 - Recurso Eólico Disponível Local

A região Nordeste do Brasil está situada dentro da influencia dos ventos alísios de SE, caracterizado por sua constância em intensidade e direção.

Os dados de vento e temperatura do ar utilizados nesse trabalho foram medidos pela UFPE – Universidade Federal de Pernambuco (Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE) na área de provas dos aerogeradores, localizado na cidade de Olinda-PE, durante o período compreendido entre dezembro de 1996 e dezembro de 1998.

Devido à menor perda dos dados coletados, foi escolhido o ano de 1998 para esse estudo, assim mesmo nessa série histórica ocorreram perdas de registro referentes ao período de 06 a 17 de abril (273 amostras) e de 19 de setembro a 03 de outubro (337 amostras), o que representou cerca de 6,9% do total dos dados. Esses vazios na série de dados foram preenchidos com base na matriz de transição de Markov aplicados no software Windographer, que mantém as propriedades estatísticas da série [34] e [35].

As medições foram realizadas a uma altura de 20 m do nível do solo com uma taxa de amostragem de 1 Hz e registradas a cada dez minutos. Os dados foram processados, via integração para se obter as médias horárias.

Foram utilizados nas medições anemômetros Maximum #40, termômetros e Registrados (Loggers) NRG 9200 e 9300, todos os equipamentos fabricados pela NRG Systems, com as especificações informadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Especificações dos equipamentos utilizados nas medições

Equipamento	Tipo do sensor	Faixa do sensor	Precisão
Anemômetro Maximum #40	Anemômetro de 4 copos	1m/s a 96 m/s	$\pm 0,1$ m/s
Termômetro	Circuito integrado; sensor de temperatura com seis placas; escudo de radiação	-40°C a 52,5 °C	$\pm 1,11$ °C

As principais características estatísticas da série usada foram estimadas com o auxílio de modelos simplificados [34]. Para a altura de 20 m foram encontrados os seguintes resultados para velocidade média anual (5,58 m/s), desvio padrão (1,77 m/s), e constantes da distribuição de Weibull, ($k = 3,49$) e ($c = 6,29$ m/s), conforme Figura 5.3.

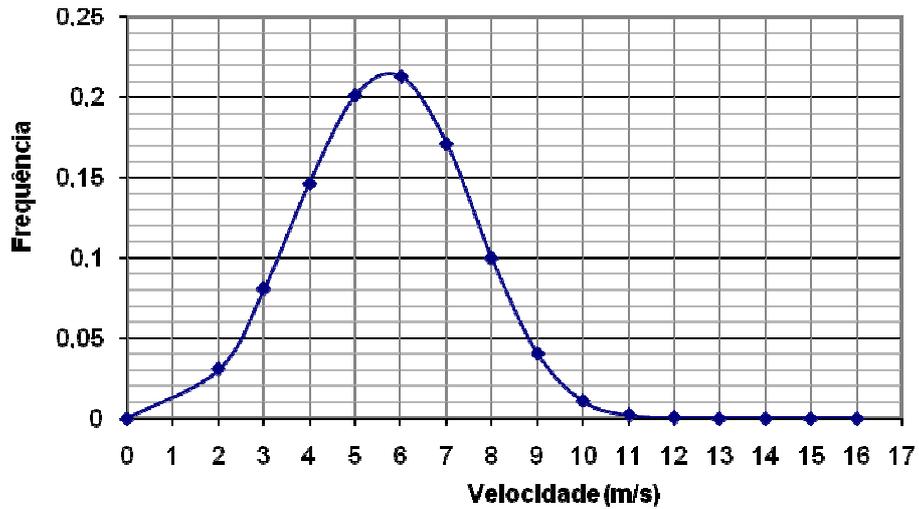


Figura 5.3 - Distribuição de Weibull para ventos de Olinda em 1998 – 20 m.

5.2.1 – Padrões Característicos das Velocidades Eólicas Locais

A Figura 5.4 mostra a evolução das médias mensais das velocidades de vento medidas na altura de 20 m no ano de 1998, e comparativamente, às alturas de 35 e 80 metros obtidas pelo uso da Equação (5.1). Este comportamento é um dado importante para se estimar a energia disponível nos ventos ao longo do ano.

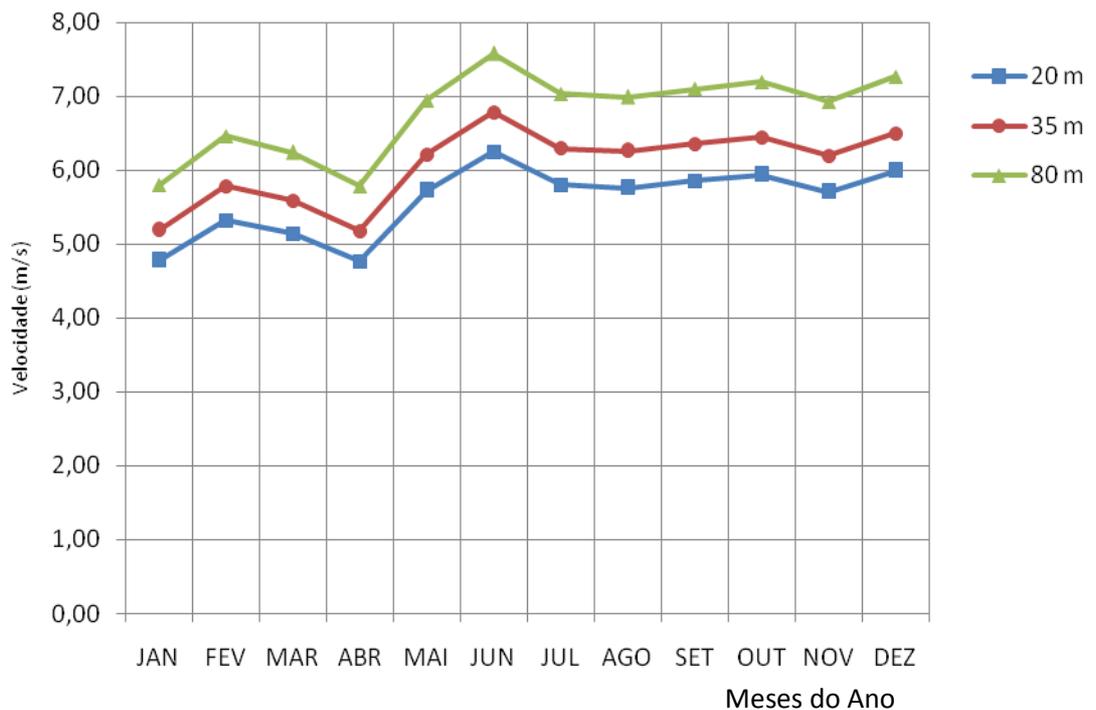


Figura 5. 4 - Médias mensais da velocidade do vento.

O levantamento da distribuição ao longo do dia, para uma altura de 20 m da velocidade do vento durante os meses do ano, conforme Figuras 5.5 mostrou que as maiores velocidades do vento foram alcançadas no período da tarde e início da noite.

No anexo I é apresentado os gráficos que mostram o padrão de comportamento das variações das médias horárias, das velocidades de vento, para cada mês do ano de medidas. No eixo das abscissas estão às horas do dia e nas ordenadas a velocidade do vento (m/s). O conhecimento desse padrão sobre a variabilidade horária ao longo do dia, mês a mês, fornece informação importante para a operação dos aerogeradores e sistemas auxiliares.

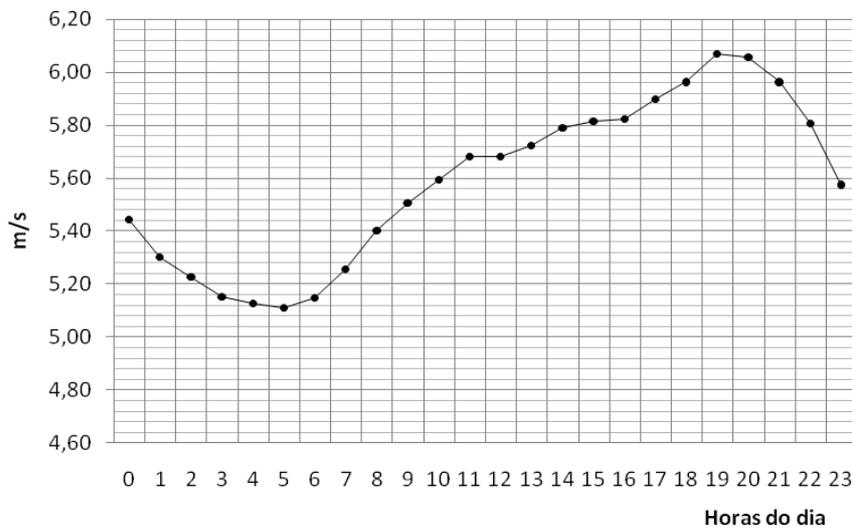


Figura 5.5 – Variação horária da velocidade do vento (Ano 1998)

A Tabela 5.2 apresenta as máximas, médias e mínimas velocidades de vento para cada mês, durante o ano de 1998, e também fornece o desvio padrão e as constantes de Weibull para uma altura de 20 metros. Os parâmetros k e c foram obtidos de acordo com [31], sendo calculados através das Equações (5.4) e (5.5).

Cálculo da velocidade média:

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (5.2)$$

Cálculo do desvio padrão:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n}} \quad (5.3)$$

Cálculo parâmetro c (fator de escala):

$$c = \frac{2V_m}{\sqrt{\pi}} \quad (5.4)$$

Cálculo parâmetro k (fator de forma):

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{V_m} \right)^{-1,090} \quad (5.5)$$

Tabela 5.2 – Dados de vento - Olinda - altura 20 m

Mês 1998	Média (m/s)	Min. (m/s)	Max. (m/s)	Std. Dev. (m/s)	Weibull k	Weibull c (m/s)
Jan	4,78	0,13	8,17	1,33	4,03	5,39
Fev	5,32	1,07	8,02	0,98	6,32	6,00
Mar	5,14	0,12	12,01	1,56	3,67	5,80
Abr	4,77	0,01	12,62	1,91	2,71	5,38
Mai	5,72	0,23	11,67	2,26	2,75	6,45
Jun	6,25	0,65	10,93	2,22	3,09	7,05
Jul	5,80	0,31	9,95	2,20	2,88	6,54
Ago	5,76	0,14	10,70	2,21	2,84	6,50
Set	5,85	0,38	11,01	1,44	4,61	6,60
Out	5,93	0,04	9,69	1,46	4,61	6,69
Nov	5,71	2,68	8,44	0,95	7,06	6,44
Dez	5,99	1,96	9,45	1,08	6,47	6,76

5.2.2 – Padrões Característicos das Temperaturas do Ar Local

As temperaturas foram registradas com o termômetro instalado em uma altura de 20 m, durante o período relativo ao ano de 1998. Os dados indicaram uma temperatura máxima de 32,1 °C e uma temperatura mínima de 21,4°C. A temperatura média anual alcançou o valor de 27,5°C.

A análise da distribuição das temperaturas do ar durante os meses do ano, conforme Figura 5.6 mostra que seus maiores valores foram alcançados em torno do meio dia. Nas abscissas estão representadas as horas e nas ordenadas a temperatura (°C). No anexo estão apresentados os gráficos com as variações horárias de temperatura ao longo dos meses.

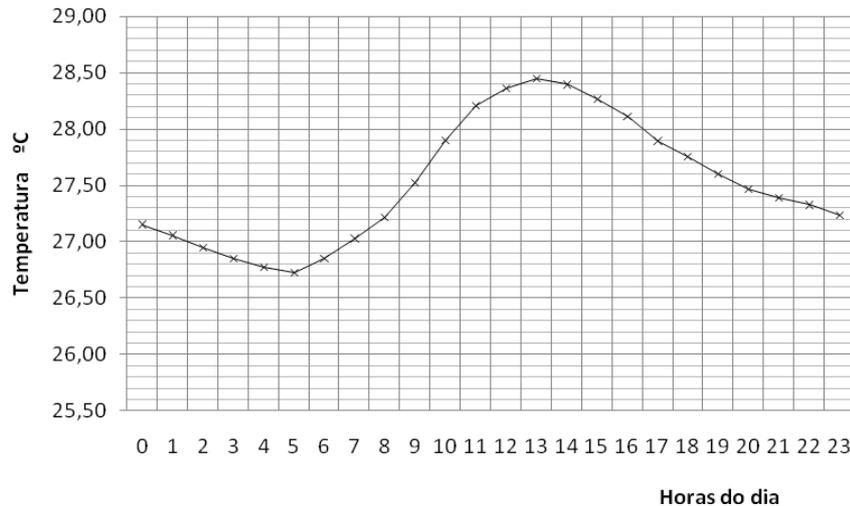


Figura 5.6 – Variação horária de temperatura (ano 1998)

5.2.3 - Avaliação da Variação da Massa Específica

A massa específica, do ar seco à pressão atmosférica padrão no nível do mar e a uma temperatura de 15°C, igual a 1,225 kg/m³, é usada como um padrão na indústria eólica [13], devendo esse padrão ser utilizado quando do levantamento das curvas de potências dos aerogeradores .

A massa específica média anual encontrada , para uma altura de 20 m, foi de 1,179 kg/m³, a mínima encontrada foi 1,154 kg/m³ e a máxima de 1,196 kg/m³, conforme dados da Tabela 5.3.

Os valores da massa específica do ar foram encontrados, conhecidos a altura e a temperatura, utilizando-se a Equação (5.6), onde ρ é a massa específica em kg/m³, T a temperatura em graus Kelvin e Z a altura em metros, sendo aplicada para cada dado de temperatura disponibilizado [34].

$$\rho = \frac{353,049}{T} e^{\left(-0,034 \frac{Z}{T}\right)} \quad (5.6)$$

Tabela 5.3 - Massa Específica – valores mensais (kg/m³)

Mês	Média	Mínima	Máxima
Jan	1,168	1,162	1,185
Fev	1,166	1,160	1,178
Mar	1,166	1,154	1,182
Abr	1,167	1,159	1,185
Mai	1,171	1,162	1,187
Jun	1,175	1,165	1,192
Jul	1,177	1,168	1,196
Ago	1,179	1,169	1,194
Set	1,175	1,167	1,193
Out	1,174	1,164	1,190
Nov	1,171	1,164	1,178
Dez	1,170	1,162	1,182

5.3 - Procedimento Utilizado para o Levantamento Energético

A energia disponível para um aerogerador é a energia cinética associada a um tubo de corrente de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante v (m/s). O fluxo de massa de ar que atravessa a seção plana transversal A (m²) do rotor do aerogerador é ρAV (kg/s), onde ρ é a massa específica do ar. A potência disponível no vento (P [W]), fica portanto, proporcional ao cubo da velocidade do vento, Equação (5.7) [13].

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (5.7)$$

5.3.1 - Perfil da Potencia Energética Local

Com os dados dos registros de temperatura e velocidade dos ventos disponíveis foi levantado o perfil energético local (PEL) através dos seguintes procedimentos:

- 1) As massas específicas médias horárias, para os respectivos registros de velocidades do vento e temperaturas, foram calculadas utilizando a Equação (5.6), para a altura de 20 metros.

$$\rho_i = \frac{353,049}{T_i} e^{\left(-0,034 \frac{Z}{T_i}\right)}$$

- 2) Com as velocidades médias do vento e sua correspondente massa específica, obtida no item 1, e utilizando-se a Equação (5.7), foram calculadas as energias disponibilizadas pelo vento, em cada hora (i), na altura de 20 metros por área unitária de rotor.

$$P_i = \frac{1}{2} \rho_i AV_i^3 \quad i = 1, 2, \dots, 8760.$$

- 3) Foi procedido o somatório de toda a energia disponibilizada, por unidade de área do rotor, no período do ano de 1998.

$$EAD = \sum_{i=1}^{8760} \frac{1}{2} \rho_i AV_i^3 \quad , \text{ para } A = 1. \quad (5.8)$$

- 4) Com os dados disponíveis sintetizados para valores médios horários de magnitudes de ventos, procedeu-se a uma distribuição das velocidades eólicas em classes ou faixas pré-definidas de comprimento, de passo $\Delta=0,5$ m/s, variando esta segmentação, desde 0 a 16m/s, amplitude das variações das médias horárias dos

dados disponíveis, sendo a primeira faixa entre 0 e 0,50 m/s, resultando a divisão na seguinte série; 0, 0,5; 1,0; 1,5; ... 15,0; 15,5; 16,0 m/s.

$$\Delta_1 = 0 < V \leq 0,5; \Delta_2 = 0,5 < V \leq 1,0; \dots; \Delta_{32} = 15,5 < V \leq 16$$

- 5) Para cada segmento foi integrada a energia disponibilizada no período para aquela faixa de velocidade. Cada total de energia disponibilizada, por segmento de velocidade, foi dividida pela energia total do período. O resultado foi uma série de números adimensionais, variando em função da faixa da velocidade. Cada valor adimensional informa a energia disponibilizada, no local, para aquela faixa de velocidade de vento. Esta série de dados foi denominada Perfil Energético Local (PEL), para a altura de 20 metros. E_V é a energia no intervalo de velocidade.

$$E_{\Delta_j} = \sum_{j=1}^{32} E_V \quad (5.9)$$

$$PEL_{\Delta_j} = \frac{E_{\Delta_j}}{EAD} \quad , \text{ para } j = 1, 2, \dots, 32. \quad (5.10)$$

Para se extrapolar o *PEL* para alturas diferentes das medidas pelos anemômetros foi necessário, antes de repetir os passos de 1 até 5, extrapolar os dados de vento e temperaturas para a altura desejada.

Os dados de velocidades de vento, para alturas distintas, foram calculados utilizando a Equação (5.1). Neste estudo, em virtude de se dispor apenas das medições relativas à altura de 20 metros, não foi possível se calcular o valor do fator de rugosidade do terreno, por meio da Equação (5.1), tendo o mesmo sido obtido através da Tabela 5.4. O local do levantamento dos dados é um terreno descampado próximo ao mar sendo adotado o valor de z_{or} em 0,03 m.

Tabela 5.4 – Valores típicos de Z_{or}

Tipo de Terreno	Z_{or} (m)
Deserto plano, mar agitado	0,001
Planícies gramadas	0,01
Campo aberto com poucas árvores	0,03
Campo com arvores	0,1
Povoação nos subúrbios	0,3
Centro da cidade	0,7

Fonte: [9]

Para as alturas de 35m e 80 m foi considerada desprezível a variação da temperatura, sendo usada a temperatura na altura de 20 metros.

Os valores levantados do Perfil Energético Local (PEL), para as três alturas, estão apresentados na Tabela 5.5 e de forma gráfica na Figura 5.7.

Para se reconstituir a energia anual disponível por unidade de área, em determinada faixa de velocidade, multiplica-se o percentual daquela faixa de velocidade (Tabela. 5.5) pela respectiva energia total (Tabela. 5.6) obtendo-se a energia anual disponível (EAD [kW/m²]) no vento para a velocidade desejada.

Tabela 5.5 - Perfil Energético Local – Olinda/98

v (m/s)	PEL20m (%)	PEL35m (%)	PEL80m (%)
0,5	0,00	0,00	0,00
1,0	0,00	0,00	0,00
1,5	0,02	0,01	0,01
2,0	0,04	0,03	0,02
2,5	0,09	0,07	0,05
3,0	0,18	0,12	0,08
3,5	0,45	0,24	0,12
4,0	1,13	0,62	0,23
4,5	2,47	1,32	0,60
5,0	5,06	2,78	1,24
5,5	8,28	4,92	2,32
6,0	10,81	7,93	3,99
6,5	12,52	10,19	6,06
7,0	13,45	11,48	8,17
7,5	13,08	12,18	9,89
8,0	9,26	12,40	10,86
8,5	8,21	9,21	10,88
9,0	5,86	8,24	10,73
9,5	4,65	6,18	8,64
10,0	2,25	4,78	7,36
10,5	1,18	3,79	5,52
11,0	0,50	1,77	4,80
11,5	0,14	0,95	3,79
12,0	0,16	0,39	2,01
12,5	0,09	0,07	1,40
13,0	0,10	0,16	0,53
13,5	0,00	0,09	0,26
14,0	0,00	0,10	0,07
14,5	0,00	0,00	0,16
15,0	0,00	0,00	0,09
15,5	0,00	0,00	0,01
16,0	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.6 – Energia anual total disponível na série de vento por metro quadrado.

Altura	20 m	35 m	80 m
Energia (kW/m ² -ano)	1.143,98	1.463,85	2.069,6

A Figura 5.8, apresenta o aumento da energia disponível com o aumento da altura da torre. O principal limitador da altura da torre para pequenos aerogeradores é o seu custo final.

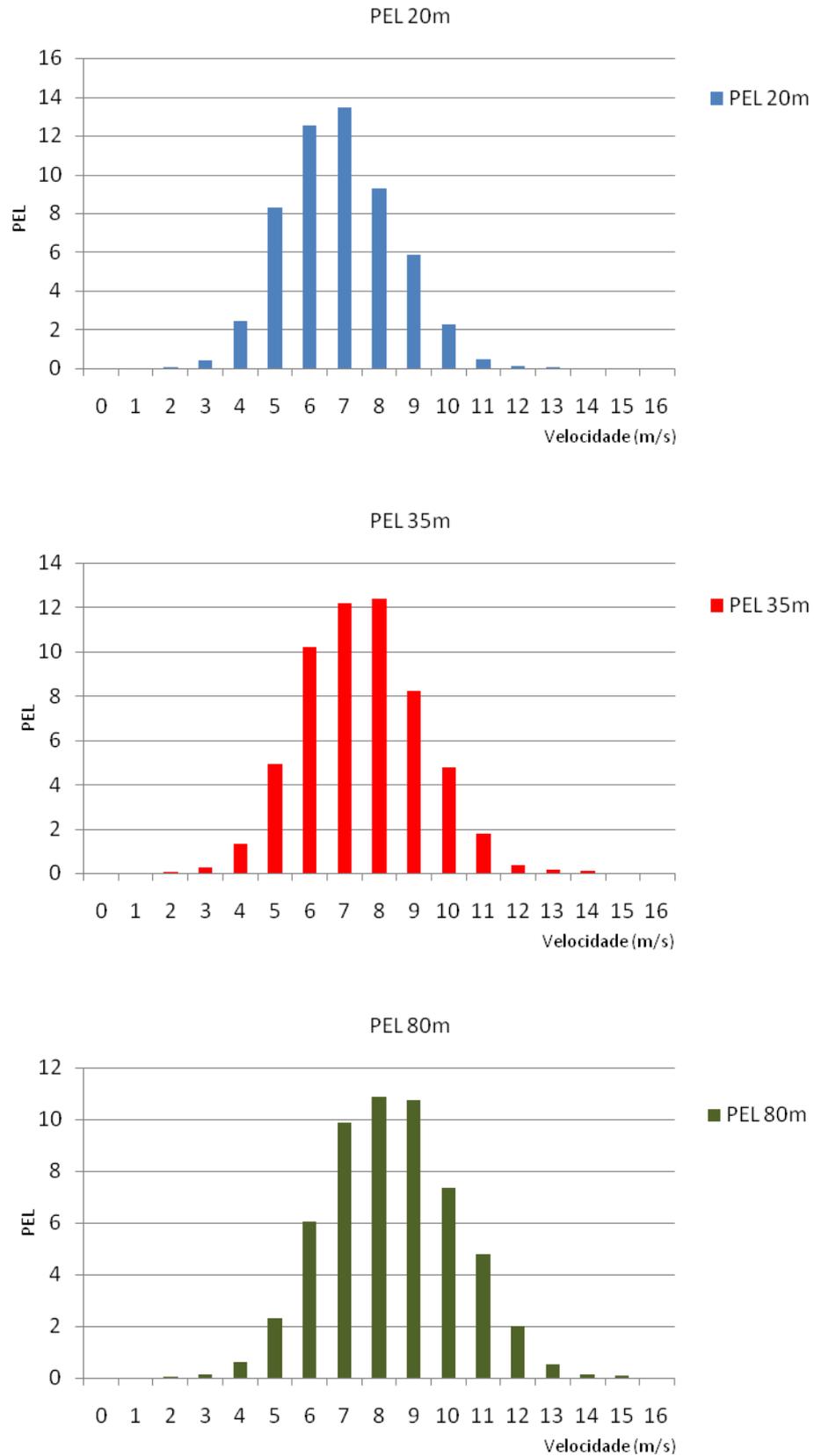


Figura 5.7 – Perfil Energético Local em diversas alturas do solo.

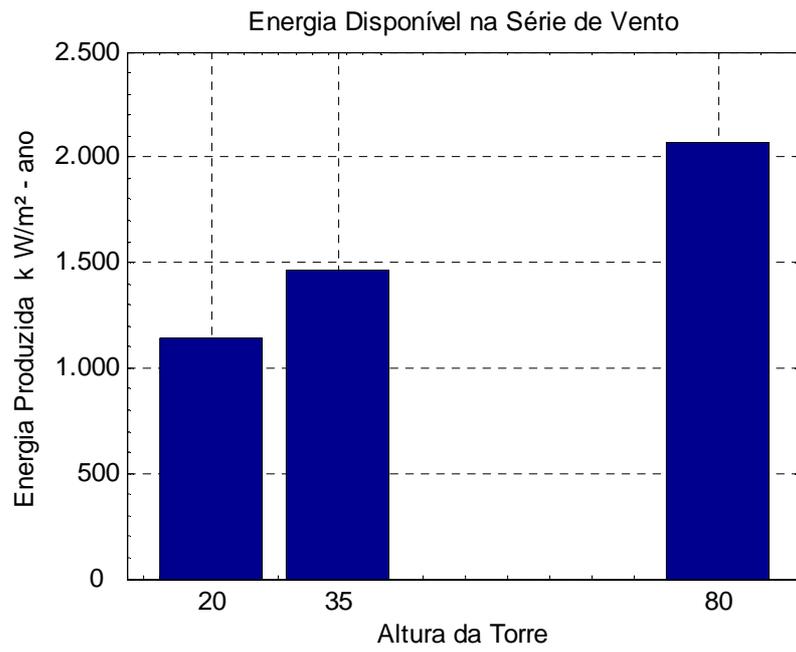


Figura 5.8 – Efeito da altura da torre no potencial energético local

SEXTO CAPÍTULO – APLICAÇÕES COM PEQUENOS AEROGERADORES

6.1 - Levantamento da Energia Disponível no Vento na pressão Atmosférica Padrão

O levantamento da energia disponível no vento para a pressão atmosférica padrão (massa específica de $1,225 \text{ kg/m}^3$) foi realizado com o uso da Equação (5.7). Este procedimento tem o objetivo de permitir a comparação direta dos dados com as curvas de potência dos aerogeradores escolhidos, que devem estar referenciadas à pressão atmosférica padrão, conforme Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Potência unitária disponível no vento – atmosfera padrão

Vel m/s)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
E (W/m ²)	0,077	0,61	2,07	4,9	9,57	16,54	26,26
Vel (m/s)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
E (W/m ²)	39,20	55,81	76,56	101,90	132,30	168,21	210,09
Vel (m/s)	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5
E (W/m ²)	258,398	313,60	376,15	446,51	525,14	612,50	709,04
Vel (m/s)	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0
E (W/m ²)	815,24	931,54	1.058,40	1.196,29	1.345,66	1.506,98	1.680,70
Vel (m/s)	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5
E (W/m ²)	1.867,28	2.067,18	2.280,87	2.508,80	2.751,43	3.009,21	3.282,62

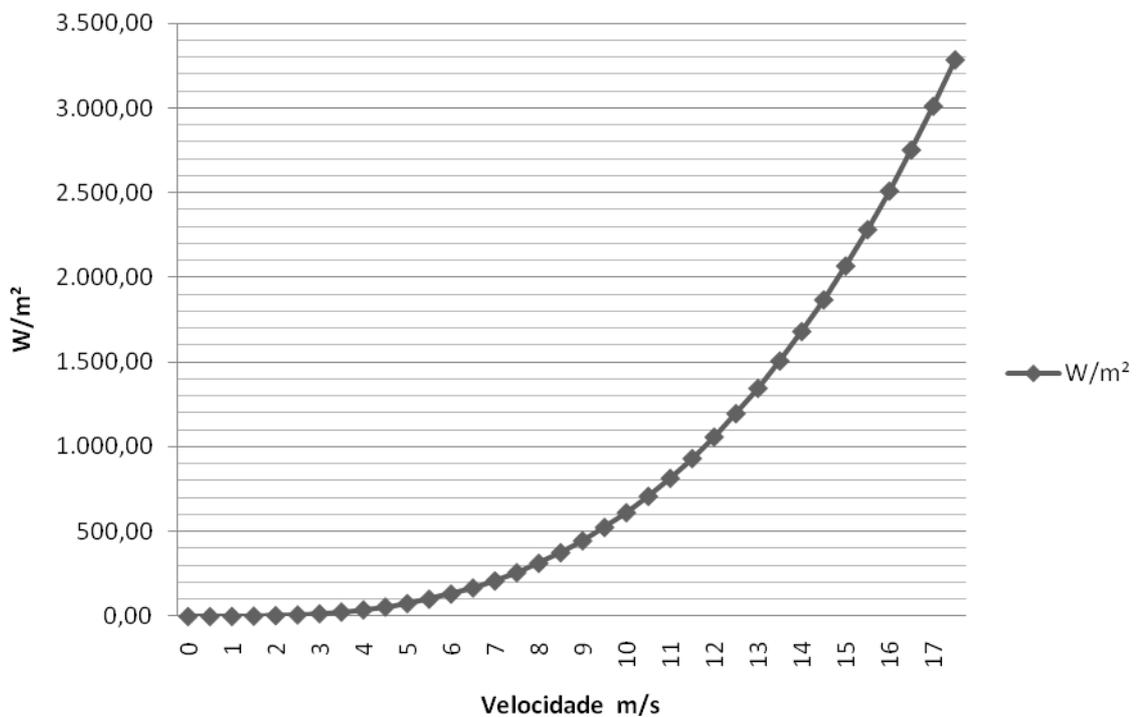


Figura 6.1 – Potência unitária na atmosfera padrão

6.2 - Levantamento do Coeficiente de Potência do Aerogerador

Com a curva de potência elétrica produzida pelo aerogerador, dado fornecido em catálogo pelos fabricantes de sistemas de pequeno porte, se identificou os valores das velocidades de vento correspondentes aqueles que são representativos da faixa de segmentação adotada para as velocidades eólicas de modo a se obter os valores correspondentes das potências elétricas que seriam produzidas (P_e). As curvas de potências dos aerogeradores comerciais são levantadas para uma condição padrão de massa específica do ar de $1,225 \text{ kg/m}^3$. O mesmo valor foi utilizado para determinar a energia disponível para cada velocidade de vento pela eq. (5.2). Utilizando a Equação. (6.1) foi calculado a estimativa do coeficiente de potência (C_p) para cada faixa de velocidades de ventos obtida através da relação entre as potências elétricas de saída (P_e) previstas pelo sistema aerogerador e a potência teoricamente disponibilizada (P_{disp}) nas velocidades correspondentes.

$$C_p(v) = \frac{P_e}{P_{disp}} \quad (6.1)$$

Tal procedimento utilizado para determinar o coeficiente de potência do aerogerador em relação às velocidades do vento tornou desnecessária sua correção para as condições locais de temperatura e altitude, visto que os dados foram adimensionalizados, podendo ser utilizados em qualquer outro local.

Considerando que as curvas de potência disponibilizadas pelos fabricantes são as curvas de potência elétrica e não a aerodinâmica, a utilização do coeficiente de potência levantado por esse método forneceria a energia elétrica produzida pelo aerogerador.

O termo coeficiente de potência utilizado nesse trabalho é entendido como sendo o coeficiente de potência aerodinâmico multiplicado pelo rendimento total do aerogerador para cada velocidade [12].

6.3 - Máquinas Utilizadas

Foram simulados neste trabalho quatro aerogeradores, sendo um com potência nominal de 5,0 kW, o segundo com 5,5 kW e os últimos de 6,0 kW, conforme detalhado na Tabela 6.2.

Os critérios de escolha para as máquinas foram de possibilitar uma autoprodução pré-estimada como adequada para uso com carga usual residencial ou de pequena empresa.

Tabela. 6.2 – Características dos aerogeradores simulados

Fabricante	Nome Comercial	Potência Nominal (kW)	Velocidade Projeto (m/s)	Nº de Pás	Diâmetro(m)	Área Varrida (m ²)	Velocidade de Partida(m/s)
VERGNET	GEV 6/5	5,0	14,0	2	6,0	28,3	3,5
WESTWIND	5,5 kW	5,0	14,0	3	5,1	20,4	3,0
EOLTEC	Scirocco	6,0	11,5	2	5,6	24,7	2,7
ENERSUD	Verne555	6,0	12,0	3	5,55	24,2	2,2

6.3.1 - Vergnet - GEV 6/5

O primeiro aerogerador analisado foi o GEV 6/5, [36], com potência de projeto de 5,0 kW a velocidade de 14,0 m/s, um rotor de 6,0 metros de diâmetro e uma velocidade de partida de 3,5 m/s. Com o gráfico da curva de potência, Figura 6.2, o mesmo foi discretizado para intervalos com passo de 0,5 m/s e aplicada a Equação (6.1) para obter o valor do coeficiente de potência, para cada velocidade.

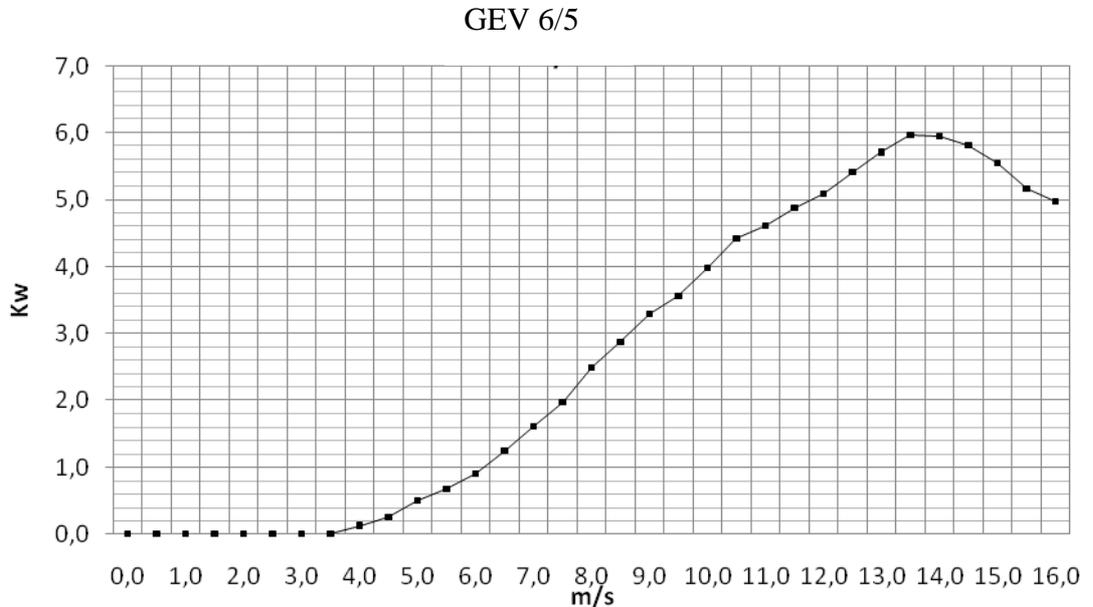


Figura 6.2 – Curva de Potencia do Aerogerador GEV 6/5

6.3.2- Westwind 5.5 kW

O segundo aerogerador analisado foi o Westwind 5.5 kW [37], com potência de projeto de 5,0 kW a velocidade de 14,0 m/s e um rotor de 5,1 metros de diâmetro. Sua velocidade de partida (cut-in) é 3,0 m/s. O mesmo procedimento aplicado ao aerogerador GEV 6/5 repetiu-se para esse aerogerador encontrando-se o seu coeficiente de potência para cada velocidade.

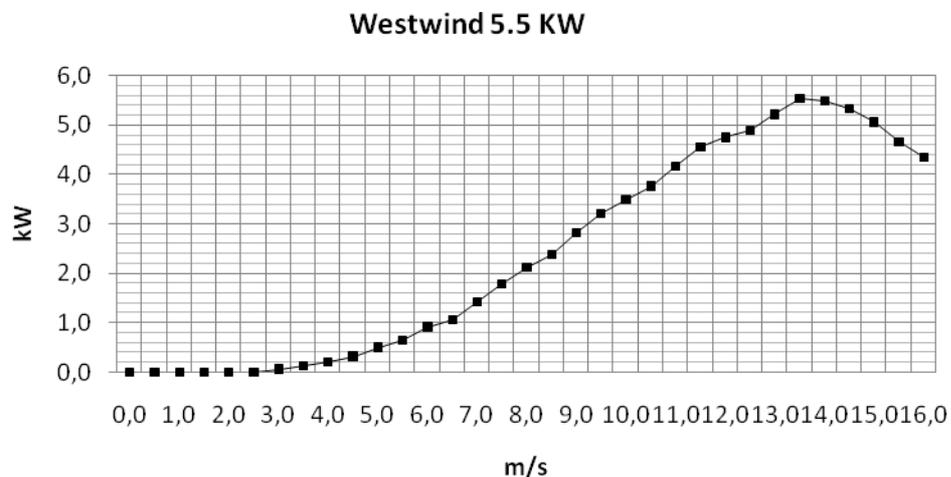
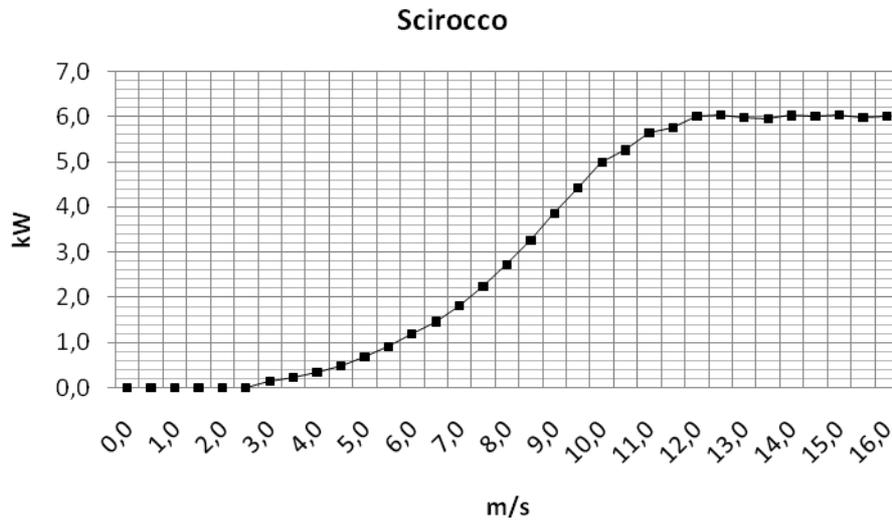


Figura 6.23– Curva de Potencia do Aerogerador Westwind 5.5 kW

6.3.3 – Eoltec – Scirocco

Figura 6.4 – Curva de Potência do Aerogerador Scirocco



O terceiro equipamento analisado foi o Eoltec - Scirocco [38], com potência de projeto de 6,0 kW a velocidade de 11,5 m/s e um rotor de 5,6 metros de diâmetro. Sua velocidade de partida (cut-in) é 2,7 m/s. Repetiu-se o mesmo procedimento aplicado aos aerogeradores GEV 6/5 e 5.5 kW obtendo-se o coeficiente de potência para cada velocidade

6.3.4 – Enersud – Verne555

O quarto e último equipamento analisado foi o Enersud Verne 555 [39], com potência de projeto de 6,0 kW a velocidade de 12,0 m/s e um rotor de 5,55 metros de diâmetro. Sua velocidade de partida (cut-in) é 2,2 m/s. Repetiu-se o mesmo procedimento aplicado aos aerogeradores GEV 6/5 e 5.5 kW e Scirocco obtendo-se o coeficiente de potência para cada velocidade.

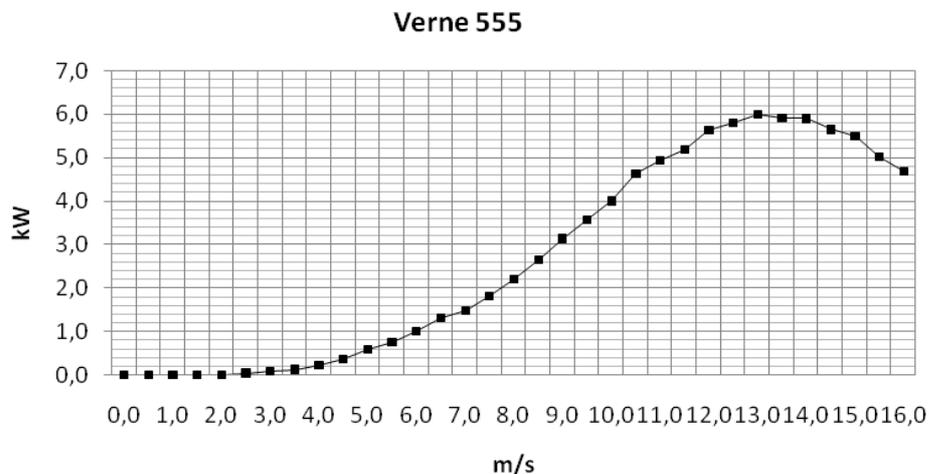


Figura 6.5 - Curva de Potência do Aerogerador Verne 555

6.4 – Cálculo dos Coeficientes de Potência dos Aeroeradores

Tabela 6.3 – Dados da curva e coeficientes de potência dos aeroeradores

Modelo	GEV		5.5 KW		Scirocco		Verne 555	
	Pe	Cp	Pe	Cp	Pe	Cp	Pe	Cp
0,0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
0,5	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
1,0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
1,5	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
2,0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
2,5	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,17
3,0	0,0	0,00	0,1	0,19	0,1	0,34	0,1	0,19
3,5	0,0	0,00	0,1	0,23	0,2	0,34	0,1	0,19
4,0	0,1	0,11	0,2	0,26	0,3	0,35	0,2	0,24
4,5	0,3	0,16	0,3	0,28	0,5	0,35	0,4	0,26
5,0	0,5	0,23	0,5	0,32	0,7	0,36	0,6	0,31
5,5	0,7	0,23	0,6	0,31	0,9	0,36	0,7	0,30
6,0	0,9	0,24	0,9	0,34	1,2	0,36	1,0	0,31
6,5	1,2	0,26	1,1	0,31	1,5	0,35	1,3	0,32
7,0	1,6	0,27	1,4	0,33	1,8	0,35	1,5	0,29
7,5	2,0	0,27	1,8	0,34	2,2	0,35	1,8	0,29
8,0	2,5	0,28	2,1	0,33	2,7	0,35	2,2	0,29
8,5	2,9	0,27	2,4	0,31	3,3	0,35	2,6	0,29
9,0	3,3	0,26	2,8	0,31	3,9	0,35	3,1	0,29
9,5	3,6	0,24	3,2	0,30	4,4	0,34	3,6	0,28
10,0	4,0	0,23	3,5	0,28	5,0	0,33	4,0	0,27
10,5	4,4	0,22	3,8	0,26	5,3	0,30	4,6	0,27
11,0	4,6	0,20	4,2	0,25	5,6	0,28	4,9	0,25
11,5	4,9	0,19	4,6	0,24	5,8	0,25	5,2	0,23
12,0	5,1	0,17	4,8	0,22	6,0	0,23	5,6	0,22
12,5	5,4	0,16	4,9	0,20	6,0	0,20	5,8	0,20
13,0	5,7	0,15	5,2	0,19	6,0	0,18	6,0	0,18
13,5	6,0	0,14	5,5	0,18	6,0	0,16	5,9	0,16
14,0	5,9	0,13	5,5	0,16	6,0	0,15	5,9	0,15
14,5	5,8	0,11	5,3	0,14	6,0	0,13	5,6	0,13
15,0	5,6	0,10	5,1	0,12	6,0	0,12	5,5	0,11
15,5	5,2	0,08	4,7	0,10	6,0	0,11	5,0	0,09
16,0	5,0	0,07	4,4	0,09	6,0	0,10	4,7	0,08

O procedimento para o levantamento do coeficiente de potência dos aeroeradores foi dividir a energia produzida pelo aeroerador para cada velocidade pela energia disponibilizada no vento no mesmo padrão atmosférico

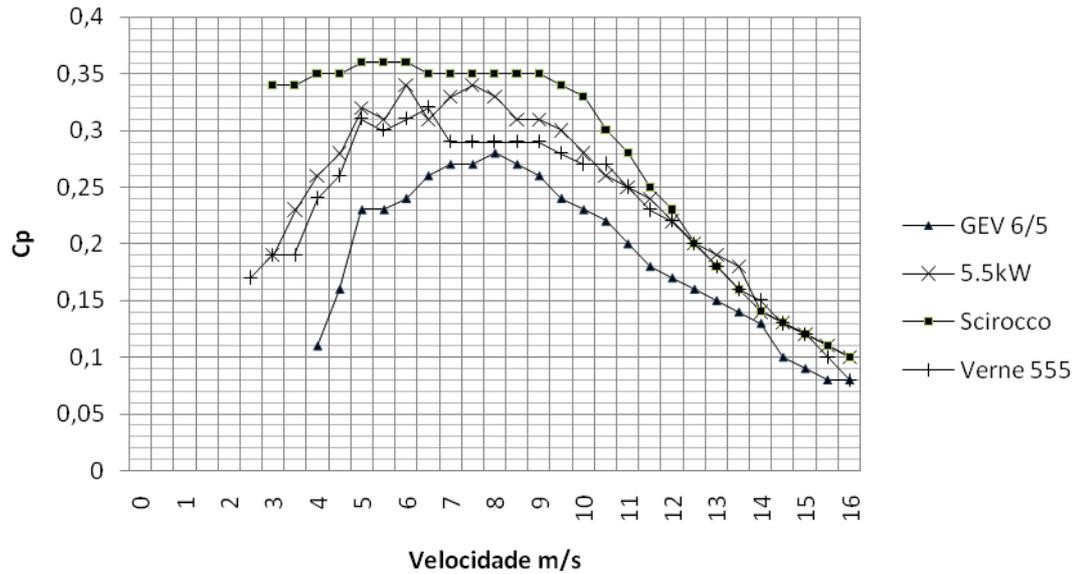


Figura 6.6 – Coeficiente de potência dos aerogeradores

6.5 – Seleção do aerogerador

Com os dados disponibilizados na Tabela. 5.5 e os dados da Tabela. 6.3 foram os valores correspondentes a cada velocidade na altura do rotor multiplicados e os resultados para cada altura foram integralizados encontrando-se um coeficiente de desempenho de cada aerogerador para cada altura correspondente.

O maior índice indicará o rotor com desempenho mais adequado as características de ventos do local de sua instalação. Os resultados encontrados para os aerogeradores analisados, calculados pela Equação (6.2), estão apresentados na Tabela. 6.4.

$$CD = \sum_{v=0}^{v=16} PEL(v) \times Cp(v) \quad (6.2)$$

Onde CD é o coeficiente de desempenho, $PEL(v)$ o perfil energético local para determinada velocidade e $Cp(v)$ o correspondente coeficiente de potência.

Este procedimento tem a vantagem de identificar o melhor aerogerador para um dado local, O aerogerador de melhor desempenho será o que apresentar o maior coeficiente, para determinada altura.

Tabela 6.4 - Coeficientes de desempenho (CD) dos aerogeradores

Aerogerador	GEV 6/5	5.5 kW	Scirocco	Verne555
Torre 20 m	0,20990	0,29086	0,33043	0,27445
Torre 35 m	0,22080	0,29490	0,33106	0,27736
Torre 80 m	0,24450	0,30077	0,33138	0,28055

A energia anual gerada por cada aerogerador (EAT em kWh- ano) (Tabela 6.5), foi determinada multiplicando-se o coeficiente de desempenho (CD) (Tabela. 6.4) para determinada altura pela energia total disponível (EAD em kWh/m² ano) (Tabela 5.6.) e a área do seu rotor (A em m²), (Tabela 6.1).

Calculo da Energia Anual gerada por cada aerogerador para determinada altura de torre é feito utilizando a Equação (6.3).

$$EAT = CD \times EAD \times A \quad (6.3)$$

Tabela 6.5 – Energia anual produzida pelos aerogeradores em kwh

Aerogerador	GEV 6/5	5.5 kW	Scirocco	Verne 555
Torre 20m	6.115,91	6.109,08	8.403,08	7.595,97
Torre 35m	8.232,39	7.925,84	10.773,19	9.825,58
Torre 80m	12.042,76	11.218,68	15.140,09	14.051,32

O aerogerador mais adequado do ponto de vista econômico foi o que apresentou o menor quociente dividindo o seu custo total quando instalado pelo total de energia gerada.

Em virtude da instabilidade financeira internacional, levando a uma grande variabilidade no fator de conversão de moeda estrangeira para o real tomou-se por base o valor de um aerogerador de fabricação nacional com potencia projetada de 5 kW, na sua configuração para conexão a rede elétrica e uma altura da torre de 35 metros.

Com base no exposto no parágrafo anterior, onde foi fixado o mesmo preço para todos os três aerogeradores, sobressaiu-se o aerogerador Scirocco, que nos capítulos subsequentes foi utilizado para a análise de investimento.

O crescente aumento na produção de energia com o aumento da altura da torre leva a outra análise econômica para definir qual a altura adequada para a instalação do equipamento.

A utilização de uma torre de 80 metros para aerogeradores do porte estudado certamente se mostrará antieconômica, porém pode-se alternativamente se considerar como sendo o perfil de uma localidade onde a velocidade média do vento a 35 metros seja 6,78 m/s. Tal velocidade média na altura de 35 metros facilmente é encontrada em localidades litorâneas no Rio Grande do Norte e no Ceará [40].

6.6 – Comparativo entre o PEL e outros Procedimentos

Na altura de 20 m foram encontrados os seguintes resultados para velocidade média anual (5,58 m/s), desvio padrão (1,77 m/s), e constantes da distribuição de Weibull, ($k = 3,49$) e ($c = 6,29$ m/s) [34], massa específica média anual ($\rho = 1,177$) e o fator do perfil exponencial ($\alpha = 0,14$), na região costeira de Olinda/PE. Com esses dados e utilizando-se o software Windographer, produzido e distribuído pela Mystaya Engineering Inc, foram encontradas as produções de energia para os aerogeradores em estudo, conforme Tabela 6.6

Tabela 6.6 – Comparativo da produção pelos aerogeradores em kWh – ano

Método	Aerogerador	GEV 6/5	5.5 KW	Scirocco	Verne 555
Windographer	Torre 20m	8.249,00	7.677,00	10.229,00	8.399,00
Weibull	Torre 20m	8.569,80	7.954,50	10.538,00	8.576,80
PEL	Torre 20m	6.115,91	6.109,08	8.403,08	7.595,97

Os valores encontrados pelo método PEL, foram sempre inferiores aos fornecidos pelo software e o método utilizando os parâmetros de Weibull. A diferença encontrada poderia ser motivada pelo processo de discretização das faixas de velocidades. A utilização dos aerogeradores em um teste de campo monitorado por sensores de temperatura e velocidade do vento poderia esclarecer as diferenças entre os resultados obtidos.

SÉTIMO CAPÍTULO – ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL [40] classifica como pequeno aerogerador máquinas eólicas geradoras com potência nominal igual ou inferior a 500 kW. Outras classificações são mais detalhadas considerando como sendo de pequeno porte aquelas de potência nominal de centenas de W a unidades de kW com diâmetro de rotor de 02 – 08 m, sendo destinadas tipicamente à utilização em sistemas isolados. De médio porte, aquelas com potências nominais na faixa de unidades a dezenas de kW e diâmetros de rotor de 10m a 15m, conforme [41]. A seleção e aplicação de aerogeradores de pequeno ou de médio porte para geração de energia elétrica constituem-se numa alternativa tecnológica ainda muito pouco utilizada no Brasil. Através de uma análise comparativa entre o custo do kWh gerado por um pequeno aerogerador com o de um de grande porte pode-se constatar que os mercados potenciais a serem ocupados por elas são distintos, ou seja, enquanto a energia gerada pelo de grande porte seria direcionada para venda às concessionárias àquela gerada pelos de pequeno porte atuaria no segmento de autoprodução resultando numa diminuição da pressão de demanda de compra de energia firme da concessionária. Este processo geraria um recurso financeiro diferencial potencialmente favorável ao produtor no valor do que seria pago na tarifa cobrada pela concessionária.

Conforme informação de domínio público divulgada em [41], a composição do valor final de venda da energia da concessionária aponta que o setor de geração contribui com aproximadamente 35% do custo, ficando transmissão, distribuição, encargos setoriais e tributos para completar o valor total.

Os sistemas de aerogeradores utilizados na produção de eletricidade são classificados como sistema isolado e sistema conectado a rede.

No sistema isolado os aerogeradores produzem energia elétrica que são armazenadas em bancos de baterias e então utilizando inversores elétricos são convertidas para a tensão e frequência recomendada pelos equipamentos utilizados. Os sistemas isolados são recomendados para áreas remotas, não servidas pela rede elétrica das distribuidoras e algumas situações específicas. A sua aplicação é limitada e recomendada para as pequenas aplicações elétricas

O sistema conectado a rede é aquele no qual a energia produzida pelo aerogerador é diretamente lançada na rede de distribuição de energia elétrica.

Em locais já servidos pela rede de distribuição o sistema eólico recomendado é o conectado a rede, tendo o seu custo inicial e de manutenção bastante reduzidos pela não utilização de baterias estacionárias, de custo elevado.

Este trabalho identifica o pequeno sistema eólico conectado à rede elétrica para estudar a sua viabilidade como um instrumento gerador de renda. Para tanto os dados utilizados nas simulações para a produção de energia são os dados de ventos tratados no capítulo sobre os recursos eólicos disponíveis.

A energia elétrica produzida pelo sistema do aerogerador pode ser utilizada para reduzir o consumo de energia elétrica comprada da distribuidora. O valor economizado é igual à energia produzida pelo aerogerador e consumida pelo produtor multiplicado pelo valor

do kWh cobrado pela distribuidora, incluindo os impostos e as taxas que são incorporadas na conta de energia elétrica.

7.1 - Técnicas Usadas na Avaliação do Investimento

O método do período de retorno (payback) baseia-se no número de anos requeridos para o retorno do investimento original. Ele não leva em conta os rendimentos além do período de retorno.

Dentre os métodos tradicionais, utilizou-se os indicadores Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), comumente utilizados na avaliação de projetos de investimento[42].

O Valor Presente Líquido (VPL) baseia-se na determinação do valor presente dos lucros futuros.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad 7.1$$

A Taxa Interna de Retorno (TIR) baseia-se na determinação da taxa de juros que iguala o valor presente dos retornos futuros ao investimento efetuado.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad 7.2$$

Onde I_0 é investimento inicial, k a taxa de desconto, S o valor líquido recebido ao fim do período t , n o horizonte de análise e r é a taxa interna de retorno (TIR)

A análise de investimento deverá, com base nas Equações 7.1 e 7.2, ser avaliada nas condições a seguir:

- 1 - Se o $VPL > 0$ ($TIR > k$) indica que o valor atualizado dos recebimentos é **maior** que o investimento inicial, deve-se aceitar o projeto;
- 2 - Se o $VPL < 0$ ($TIR < k$) indica que o valor atualizado dos recebimentos é **menor** que o investimento inicial, deve-se rejeitar o projeto;
- 3 - Se o $VPL = 0$ ($TIR = k$) indica que o valor atualizado dos recebimentos é **igual** ao investimento inicial, a escolha entre aceitar e rejeitar o projeto é indiferente.

7.2 - Custo da Energia Fornecida pela Distribuidora

O primeiro dado levantado foi o valor cobrado pela distribuidora. Identifica-se que os valores das tarifas são variáveis, dependendo da distribuidora de energia e no caso de consumo residencial também varia em função do total consumido mensalmente pela unidade residencial, até um consumo de 140 kWh, onde a tarifa passa ser a tarifa plena, sem desconto.

O levantamento do custo da energia elétrica foi realizado com base na tarifa residencial plena, sem descontos.

Tabela 7.1 - Reajustes da tarifa residencial em percentual

ANO	CELPE	CEMAR	CEAL	COELCE	COELBA
2004	9,9	16,45	11,16	7,71	10,08
2005	20,16	-2,82	5,6	15,5	12,41
2006	4,66	9,03	7,57	1,07	2,22
2007	0,79	3,47	5,77	-9,42	5,55
2008	2,87	11,33	11,33	5,8	-13,89
% Médio	8,66	8,43	9,74	4,10	2,99

Fonte: ANEEL

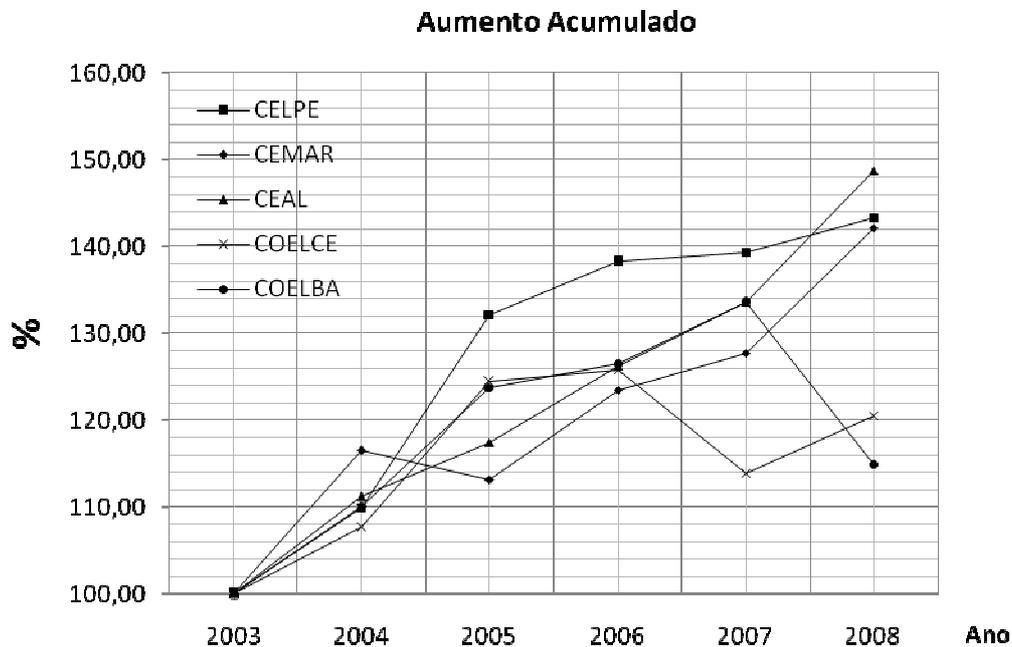


Figura 7.1 - Reajustes da tarifa residencial em percentual acumulado

Conforme explicitado na Tabela. 7.1, o percentual médio anual de reajuste tarifário, tomando como ano-base 2003, no período compreendido entre os anos de 2004 e 2008 foi de 8,66%, 8,43%, 9,74%, 4,10% e 2,99% ao ano para os consumidores residenciais da CELPE, CEMAR, CEAL, COELCE e COELBA, respectivamente.

O valor total do kWh pago por um consumidor residencial em outubro de 2008 foi R\$ 0,48923, inclusos ICMS, PIS e CONFINS, [41].

A Tabela 7.2, detalha os componentes formadores da tarifa de energia elétrica.

Tabela 7.2 – Composição Tarifária - percentual

Composição da Tarifa	%
Geração de Energia	30,31
Transmissão	2,57
Distribuição	32,00
Encargos Setoriais	4,69
Tributos	30,43
Total	100,00

Fonte: [41]

7.3 – Valor dos Equipamentos

Com exceção do aerogerador Verne 555, fabricado no Brasil pela Enersud, os demais aerogeradores objetos desse estudo são de origem estrangeira. O valor estimado do equipamento Verne 555, na sua configuração para conexão à rede elétrica e instalado em uma torre treliçada de 35 metros de altura foi de R\$ 55.000,00.

O Aerogerador Scirocco, fabricado na Europa pela empresa Eoltec, com a configuração para conexão a rede, tem um preço de venda sugerido em EUR 17.000, FOB. Considerando as dificuldades de se levantar as despesas de frete marítimo, desembaraço aduaneiro e variações cambiais teve o seu valor estimado em R\$ 55.000,00, para instalação em uma torre treliçada de 35 metros.

Os outros dois aerogeradores, considerando serem do mesmo porte dos anteriores e a mesma dificuldade no levantamento de custos de frete marítimo, desembaraço aduaneiro e variações cambiais, tiveram também seus preços estimados em R\$ 55.000,00.

7.4 - Fontes e Condições de Financiamentos Atuais

Considerando a não existência de um programa específico de estímulo a utilização da energia eólica de pequenos aerogeradores no País, ao contrário do que já ocorre na América do Norte e em vários países europeus, utilizou-se o programa de financiamento mais próximo do objetivo desse trabalho para a análise de viabilidade proposta.

Para fins de demonstração e norteamo de condições de financiamento da instalação de sistemas elétricos baseados em pequenos aerogeradores conectados à rede elétrica a análise de financiamento das instalações foi baseada no programa de financiamento para equipamentos de geração eólica de grande porte do BNDES.

As linhas de apoio financeiro do BNDES para o setor de geração de energia elétrica têm caráter permanente e podem ser concedidas a qualquer momento. Destinam-se a apoiar projetos de investimentos, visando à implantação, expansão e modernização de

empreendimentos no setor de energia elétrica. As linhas disponíveis para o setor são geração, transmissão e distribuição [43].

7.4.1 - Procedimentos Operacionais

As condições de financiamento de empreendimentos de geração eólica de grande porte atende as seguintes condições:

Custo financeiro: Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP);

Remuneração básica do BNDES: 0,9% ao ano;

Participação do BNDES está limitada a 80% do valor do bem.

O prazo total de financiamento é de até 14 anos.

Taxa de Juros = Custo Financeiro + Remuneração Básica do BNDES.

A linha PROESCO, destinada a projetos que contribuam para a eficiência energética permite a participação do BNDES chegar a 100% do valor do bem e possibilita um prazo máximo de carência de até 24 meses

7.4.2 – Custo Financeiro

A taxa de juros de longo prazo (TJLP) foi instituída pela medida provisória nº 684, de 31.10.94, sendo definida como o custo básico dos financiamentos concedidos pelo BNDES. A TJLP é fixada pelo conselho monetário nacional e divulgada até o último dia útil do trimestre imediatamente anterior ao de sua vigência.

A Tabela 7.3 fornece os valores e variações da TJLP durante o período entre janeiro de 2004 até dezembro de 2008.

Tabela 7.3 – Serie histórica da taxa de juros de longo prazo – TJLP

Taxa de juros de longo prazo – TJLP % ao ano				
Ano	1ºtrim	2ºtrim	3ºtrim	4ºtrim
2004	10,00	9,75	9,75	9,75
2005	9,75	9,75	9,75	9,75
2006	9,00	8,15	7,50	6,85
2007	6,50	6,50	6,25	6,25
2008	6,25	6,25	6,25	6,25

A Figura 7.2 mostra a tendência decrescente da TJLP em um período de 60 meses de janeiro de 2004 a dezembro de 2008. Mantida a tendência ela direciona para uma redução da TJLP para um valor inferior a 1% ao final de 2013, isto é, cinco anos após o início da operação do sistema.

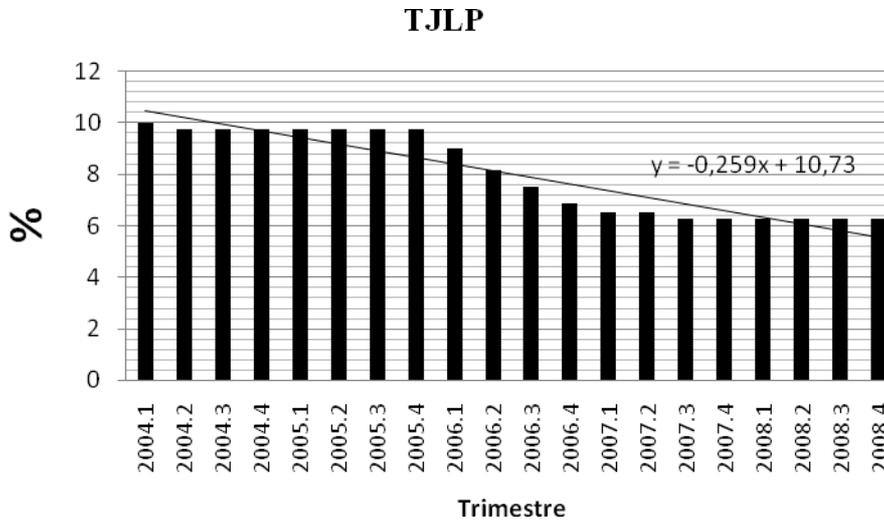


Figura 7.2 - TJLP – Curva de tendência e equação característica

A variação da TJLP nos dois últimos anos 2007 e 2008 forneceu uma tendência dada pela Equação (7.1) e nos últimos seis trimestres ficou mantida em 6,25%, sendo esse o referencial para as simulações de viabilidade dos aerogeradores.

$$y\% = - 0,035 x + 6,473 \quad (7.1)$$

7.5 – Parâmetros Adotados para a Análise da Viabilidade do Investimento

A capacidade de pagamento da instalação do sistema eólico está limitada a receita criada pelo total de energia produzida pelo aerogerador multiplicado pelo valor final da tarifa plena do segmento residencial. Supondo que toda energia produzida pelo aerogerador será consumida pelo seu proprietário.

O valor do investimento é composto de custos relacionados a estudos e projetos, obras e instalações do aerogerador, torre, inversor elétrico e demais componentes necessários para o pleno funcionamento do sistema eólico.

As condições de financiamento foi o estabelecido pelo BNDES para financiamento de grandes projetos eólicos, complementados com a possibilidade de financiamento de 100% do empreendimento previsto na linha PROESCO.

A disponibilidade de um equipamento é o total do tempo que ele está disponível para produzir energia, dividido pelo tempo total do período avaliado. Um valor típico do fator de disponibilidade de um aerogerador está entre 97% e 98%, Entre sete a 10 dias inoperante devido à manutenção e avarias, durante o ano. Foi utilizada a premissa de que a disponibilidade do aerogerador será de 100%.

Tabela 7.4 – Dados Básicos para o Financiamento

PRAZO DE FINANCIAMENTO	14 ANOS
TAXA DE JUROS	TJLP + 0,9%
PARCELA FINANCIADA	90%
CARÊNCIA	SEM CARÊNCIA
VALOR DA INSTALAÇÃO	R\$ 55.000,00

7.6 - Viabilidade do Investimento

Para a análise da viabilidade financeira da aplicação de pequenos aerogeradores foram tomados os parâmetros definidos no item 7.4 e tendo sido selecionado um aerogerador com as características do aerogerador Scirocco, instalado a uma altura de 35 m e produzindo um total de 10.773,19 kWh/ano, conforme Tabela 6.5.

Foi realizada uma simulação tomando-se como valor de reajustes futuros da tarifa de energia elétrica as médias dos reajustes de cada concessionária levantada.

O valor dos custos financeiros do financiamento da instalação utilizados foram os utilizados pelo BNDES nas operações de financiamento realizadas durante o ano de 2008, definidos a seguir: encargos financeiros TJLP plena, que durante o ano de 2008 foi de 6,25% ao ano e remuneração do BNDES no valor de 0,9%, durante todo o período de financiamento.

Apesar de nas arquiteturas de financiamentos o BNDES trabalhar com a opção de prazos de carência de até 02 anos, ele não foi utilizado e as amortizações, para simplificação da análise econômica foi definida como sendo anual.

Outro incentivo geralmente concedido em financiamentos é o rebate de parte do valor amortizado dentro de datas definidas nos contratos. Tal incentivo também não foi incluído na análise.

A Tabela 7.5 disponibiliza os resultados anuais dos financiamentos tomando vários percentuais de reajuste de tarifa elétrica residencial plena das concessionárias.

Os valores encontrados servem para avaliar a viabilidade da utilização de pequenos aerogeradores elétricos como ferramenta eficaz para geração de renda na utilização residencial e na melhoria da competitividade no caso de pequenos e médios empreendimentos. Com a aplicação de rebates e prazos de carência específicos deverão reforçar a atratividade da utilização desses equipamentos.

Outro fator esperado é a redução do preço dos pequenos aerogeradores, decorrentes de um maior volume comercializado e devido ao surgimento de outros fabricantes levando a uma concorrência no setor de fornecimento dos equipamentos atualmente inexistente.

A análise partiu de correções do preço do kWh da energia elétrica partindo do menor valor médio anual de reajuste tarifário do período (2004-2008) que foi de 2,99%, aplicado aos consumidores da COELBA até o valor médio anual dos reajustes das cinco distribuidoras de energia, no mesmo período, que foi de 6,17%.

O custo do capital foi estimado em 10% ao ano, que é um valor superior ao rendimento auferido pela aplicação financeira em caderneta de poupança. A utilização do valor de k em valores inferiores a 10% porém iguais ou superiores aos rendimentos da caderneta de poupança melhoram a atratividade na utilização de pequenos aerogeradores na produção de energia elétrica para os autoprodutores.

Tabela 7.5 – Resultado da simulação da viabilidade financeira - Scirocco

Reajuste	2,99%	4,00%	5,00%	6,00%	6,17%
ANO	Receita (R\$)	Receita (R\$)	Receita (R\$)	Receita (R\$)	Receita (R\$)
2009	-1.556,85	-1.505,21	-1.454,09	-1.402,96	-1.394,27
2010	-1.146,61	-1.039,73	-932,88	-825,01	-806,57
2011	-731,67	-565,74	-398,25	-227,54	-198,20
2012	-311,88	-82,91	150,47	390,60	432,11
2013	112,91	409,13	713,98	1.030,67	1.085,70
2014	542,84	910,74	1.293,03	1.693,97	1.764,03
2015	978,06	1.422,30	1.888,39	2.381,90	2.468,61
2016	1.418,74	1.944,21	2.500,88	3.095,93	3.201,07
2017	1.865,03	2.476,88	3.131,36	3.837,65	3.963,12
2018	2.317,11	3.020,75	3.780,71	4.608,69	4.756,59
2019	2.775,15	3.576,26	4.449,90	5.410,83	5.583,42
2020	3.239,32	4.143,88	5.139,91	6.245,93	6.445,67
2021	3.709,82	4.724,09	5.851,77	7.115,97	7.345,52
2022	4.186,82	5.317,40	6.586,59	8.023,05	8.285,30
2023	7.953,44	9.207,23	10.628,42	12.252,29	12.550,37
2024	8.191,25	9.575,52	11.159,84	12.987,42	13.324,72
2025	8.436,17	9.958,55	11.717,83	13.766,67	14.146,86
2026	8.688,41	10.356,89	12.303,72	14.592,67	15.019,72
2027	8.948,19	10.771,16	12.918,91	15.468,23	15.946,44
2028	9.215,74	11.202,01	13.564,85	16.396,32	16.930,33
VPL	7.756,55	12.091,39	16.877,39	22.218,62	23.186,88
TIR	15,78%	18,43%	21,02%	23,37	24,00%

Conforme demonstra os dados da tabela 7.5, os valores presentes líquidos (VPL) foram todos positivos e a taxa interna de retorno foram todas superiores a 10%, o que torna atrativo o investimento, nas condições analisadas.

Dentre os aerogeradores o que apresentou pior desempenho foi o Westwind 5.5 KW, com potência de projeto 5,0 kW, que forneceu um total de 7.925,84 kWh no ano, para uma altura de 35 m.

Aplicando os mesmos procedimentos que foram feitos para o aerogerador que apresentou melhor desempenho o Scirocco, o aerogerador Westwind 5.5 KW apresentou os resultados apresentados na tabela 7.6.

A tabela 7.6, que apresenta os dados da simulação da viabilidade financeira da utilização do aerogerador 5.5KW, fabricado pela empresa Westwind, o investimento só passa

a ser atrativo quando os reajustes das tarifas elétricas se situem sempre superiores a 5%, quando o valor presente líquido (VPL) passa a ser positivo e a taxa interna de retorno (TIR) superior a 10%.

Tabela 7.6 – Resultado da simulação da viabilidade financeira – Westwind 5.5 KW

Reajuste	2,99%	4,00%	5,00%	6,00%	6,17%
ANO	Receita (R\$)	Receita (R\$)	Receita (R\$)	Receita (R\$)	Receita (R\$)
2009	-2.948,47	-2.910,48	-2.872,87	-2.835,25	-2.828,86
2010	-2.579,84	-2.501,21	-2.422,60	-2.343,24	-2.329,67
2011	-2.207,75	-2.085,68	-1.962,46	-1.836,87	-1.815,28
2012	-1.832,09	-1.663,64	-1.491,95	-1.315,28	-1.284,75
2013	-1.452,76	-1.234,83	-1.010,56	-777,57	-737,08
2014	-1.069,65	-798,98	-517,73	-222,76	-171,22
2015	-682,64	-355,81	-12,91	350,16	413,96
2016	-291,62	94,97	504,52	942,30	1.019,64
2017	103,54	553,67	1.035,17	1.554,79	1.647,10
2018	502,95	1.020,61	1.579,72	2.188,86	2.297,67
2019	906,74	1.496,12	2.138,86	2.845,82	2.972,79
2020	1.315,05	1.980,53	2.713,31	3.527,02	3.673,96
2021	1.728,01	2.474,21	3.303,85	4.233,92	4.402,80
2022	2.145,76	2.977,52	3.911,27	4.968,07	5.161,01
2023	5.851,35	6.773,77	7.819,33	9.014,01	9.233,31
2024	6.026,30	7.044,72	8.210,30	9.554,85	9.803,00
2025	6.206,49	7.326,51	8.620,81	10.128,14	10.407,85
2026	6.392,06	7.619,57	9.051,85	10.735,83	11.050,01
2027	6.583,19	7.924,35	9.504,45	11.379,98	11.731,80
2028	6.780,02	8.241,32	9.979,67	12.062,78	12.455,65
VPL	-5.454,98	- 2.265,84	1.255,22	5.184,77	5.897,12
TIR	6,23%	8,53%	10,76%	12,96%	13,33%

OITAVO CAPÍTULO - LEGISLAÇÃO E A QUESTÃO POLÍTICA

8.1 – Introdução

Neste capítulo é feita uma breve análise da atual utilização de pequenos aerogeradores e os sistemas adotados em alguns países com tradição no uso desses sistemas e a situação atual no Brasil.

A Aneel define **Autoprodutor de energia elétrica** como sendo a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo.

Objetivo principal do autoprodutor é o consumo da energia produzida e comercializar os excedentes, sendo isento de encargos para a energia auto consumida

8.2 – Pequenos Aerogeradores nos Estados Unidos da América

Pequenos aerogeradores conectados a rede são sistemas dimensionados para residências, fazendas e pequenos negócios. É uma indústria que experimentou um grande crescimento na década passada.

A American Wind Energy Association – AWEA classifica como pequeno aerogerador os equipamentos com potencia igual ou inferior a 100 kW e que teve o seu mercado crescido de forma significativa. Os Estados Unidos da América é o produtor líder mundial de pequenos aerogeradores. Esses equipamentos são utilizados em localidades distantes e isoladas da rede elétrica de forma individual ou conectados a rede elétrica, para baixar a conta de energia elétrica, tornar o consumidor independente da eletricidade fornecida pela rede elétrica e evitar a imprevisibilidade do preço da energia elétrica fornecida pela concessionária. O governo americano disponibiliza vários incentivos para a instalação de pequenos aerogeradores [44].

A conexão a rede elétrica da concessionária permite ao autoprodutor a possibilidade de venda do excedente produzido à concessionária. Em alguns estados americanos o excesso da energia produzida pode ser vendido para a concessionária pelo mesmo preço com que ela é vendida para os consumidores

Dentre os procedimentos adotados está utilização de um método simplificado de medir o consumo ou produção da energia elétrica produzida pelo sistema que é o “*net-metering*” que pode ser entendido como a leitura do saldo da eletricidade em determinado período. Por esse método a energia produzida pelo pequeno aerogerador será utilizada para fazer o medidor de consumo funcionar em sentido contrário, efetivamente estocando a energia produzida pelo autoprodutor até a sua real necessidade de consumo. Este método disponibiliza a energia produzida e consumida a um preço que o autoprodutor pagaria caso ela fosse fornecida pela concessionária. Os créditos gerados por excedente da produção poderão ser utilizados a prazos definidos pela legislação de cada Estado.

Outro sistema utilizado é o “*net-bill*”, onde a energia elétrica produzida pelo produtor é lançada na rede elétrica da concessionária e registrada em outro medidor diferente do utilizado para medir a energia consumida. Ao final do período é feito um encontro de contas do valor a ser recebido pela produção e o valor a ser pago pelo consumo e a diferença entre elas paga ou recebida pelo produtor. Este sistema é vantajoso em estados onde o valor

recebido pela energia produzida por fontes renováveis são superiores a tarifa da concessionária.

Segundo a AWEA, o único custo associado com o “*net-metering*” é indireto: o consumidor irá comprar menos eletricidade da concessionária. Isto ocorre porque o excesso de eletricidade que poderia ser vendida a concessionária a um preço do mercado atacadista é utilizado para compensar a eletricidade que teria que ser comprada pelo consumidor. A AWEA estima que essa perda de faturamento é comparável ao consumidor reduzir o consumo de eletricidade por utilização eficiente da energia elétrica utilizando lâmpadas fluorescentes compactas e outros aparelhos elétricos mais eficientes [45].

A legislação federal americana incentiva o uso da energia alternativa ajudando na compra de pequenos aerogeradores e pequenos sistemas fotovoltaicos para uso residencial, rural e pequenos negócios. Os proprietários de pequenos sistemas com potência instalada igual ou inferior a 100 kW recebem um crédito de 30% do custo do sistema instalado, não excedendo a US\$ 4.000,00.

Vários Estados e cidades americanas têm sua legislação própria de incentivo à utilização da energia de fonte renovável. Como exemplo o estado da Califórnia, entre os incentivos oferecidos está o rebate para a instalação de pequenos aerogeradores para a produção de energia elétrica de US\$ 1,70/W para os primeiros 7,5 kW instalados e US\$ 0,70/W para a potência adicional até o limite de 30 kW.

8.3 - Pequenos Aerogeradores no Reino Unido

O Reino Unido está imerso em uma campanha de lançamento de uma “estratégia para a microgeração” cujo objetivo é criar as condições sob as quais a microgeração se converta em uma fonte de geração de energia alternativa para residências, comunidades e pequenos empreendimentos. O governo tem proporcionado subvenções para a instalação de tecnologias de microgeração sob o Programa de Edifícios de Baixo Carbono (LCBP) [46].

A British Wind Energy Association identificou um forte crescimento para uso de pequenos aerogeradores destinados a geração de energia elétrica, em termos de unidades instaladas.

O relatório publicado pela BWEA (Small Wind Systems UK Market Report) ressalta que três anos de crescimento ininterrupto irá continuar através do ano de 2008 e em 2009. O crescimento de 80% levantado é decorrente não apenas de melhorias tecnológicas, mas também pela grande economia de energia feita pelo uso de pequenos aerogeradores.

A BWEA classifica como pequenos sistemas aqueles que têm uma potência instalada inferior a 50 kW que podem ser instalados em edifícios (*roof on top*) ou em campo aberto.

Programa de incentivos do Ministério de Energia do Reino Unido oferece um subsídio de £ 1.000 por kW instalado, até um máximo de £2.500 para chefe de família e pequenos e médios empresários para a instalação de pequenos aerogeradores não superando o limite de 30% do custo do equipamento instalado.

Aerogeradores até 1 kW custam em torno de £1.500 enquanto que sistemas maiores na faixa de 2,5 kW até 6 kW custam entre £11.000 e £19.000, instalados. Esses custos incluem o aerogerador, a torre, inversores e instalação. Esses custos variam dependendo da localização.

Estudos de casos realizados pela BWEA mostraram que, tendo uma boa fonte de vento, um pequeno aerogerador com potencia de 11 kW e um ciclo de vida de 20 anos pode se pagar em cinco anos de uso [47].

8.4 – Pequenos Aerogeradores na Espanha

Não se encontrou programas de incentivo de utilização de pequenos aerogeradores para geração de energia elétrica por parte do governo espanhol. O uso de pequenos aerogeradores está submetido aos mesmos procedimentos adotados para a utilização de grandes aerogeradores.

Através da edição da lei nº 54/97 e do decreto real nº 2818/998, estabeleceu os princípios de um novo modelo para o setor elétrico e a criação de um regime especial de produção de energia elétrica como um regime diferenciado do regime normal.

O governo espanhol, através do Decreto real 1663/2000, estabeleceu condições administrativas e técnicas para conexão a rede elétrica de baixa tensão das instalações solares fotovoltaicas, criando regulamentação específica com a finalidade de permitir o desenvolvimento da atividade.

A regulamentação abrange as instalações fotovoltaicas de potencia nominal não superior a 100 kVA e cuja conexão a rede de distribuição ocorra em baixa tensão. Considerou baixa tensão uma tensão não superior a 1 kV.

Define a figura do “Titular da Instalação”, que é a pessoa física ou jurídica que ostenta legalmente os direitos e obrigações decorrentes da inclusão da instalação no regime especial de produção de energia elétrica, podendo ser o proprietário, o arrendatário u o titular de qualquer outro direito que o vincule com a exploração da instalação.

Define a atividade de “Instalador Autorizado”, assim como os procedimentos para a obtenção do correspondente certificado profissional, regulados pelo Real Decreto 2224/1998, que estabelece a atividade de instalador de sistemas fotovoltaicos e eólicos de pequena potência.

A conexão das instalações fotovoltaicas, com potencia nominal não superior a 100kVA, a rede de baixa tensão segue as seguintes etapas: solicitação, determinação das condições técnicas da conexão, celebração de contrato, conexão a rede e primeira verificação, obrigações do titular da instalação e medição e tarifação, entre outras.

8.4.1 – Solicitação

O titular da instalação, ou quem pretenda adquirir esta condição, solicitará a empresa distribuidora um ponto e condições técnicas de conexão necessárias para a realização do projeto, que deverá ser acompanhada de dados do titular da instalação, situação da instalação, esquema unifilar da instalação e características técnicas do projeto. Em caso de alguma documentação adicional a empresa distribuidora solicitará no prazo de dez dias a partir do recebimento da solicitação, justificando o motivo da solicitação.

8.4.2– Determinação das Condições Técnicas da Conexão

No prazo de um mês a partir da recepção da solicitação, a empresa distribuidora notificará ao solicitante sua proposta relativa às condições de conexão, incluindo, pelo menos, os seguintes tópicos:

- a) ponto de conexão e medida proposto;
- b) tensão máxima e mínima da rede no ponto de conexão;
- c) potência de curto circuito esperada em situação normal no ponto de conexão;
- d) potência máxima disponível de conexão nesse ponto, em relação com a capacidade de transporte da linha ou, se for o caso, com a capacidade de transformação no centro de transformação;
- e) no caso em que o ponto de conexão e medida para a cessão de energia por parte do titular da instalação seja diferente da de recepção, informe justificando o motivo;
- f) no caso em que a potência nominal disponível de conexão seja inferior a da potência da instalação fotovoltaica, a empresa distribuidora deverá determinar os elementos concretos da rede que precisa modificar para igualar ambas as potências. Os gastos com as modificações ficarão a cargo do titular da instalação, se forem necessários exclusivamente para seu serviço.

No caso de divergências, a Repartição competente solucionará em um prazo máximo de três meses a partir do momento que for solicitada a sua intervenção.

8.4.3 – Celebração do Contrato

O titular da instalação e a empresa distribuidora assinarão um contrato pelo qual se regerão as relações técnicas e econômicas entre ambos, permitindo ao titular para a venda de seus excedentes de produção de energia elétrica para a empresa distribuidora, nos termos do Real Decreto Espanhol nº 2818/1998.

Uma vez acordado o ponto e as condições de conexão, a empresa distribuidora terá a obrigação de assinar o contrato no prazo máximo de um mês a partir da solicitação de sua assinatura pelo titular da instalação.

8.4.4 – Conexão a Rede e Primeira Verificação

Tendo sido superada as provas de instalação realizadas pelo instalador autorizado, este emitirá um boletim das características principais da instalação.

Uma vez tendo sido realizada as provas da instalação, assinado o contrato e recebido o relatório de superação das provas de instalação, o titular da instalação poderá solicitar a empresa distribuidora a conexão a rede elétrica.

Transcorrido um mês da solicitação de conexão a rede sem que se exijam reparos pela empresa distribuidora, o titular da instalação poderá efetuar a conexão com a rede de distribuição.

A empresa distribuidora de energia elétrica remete ao órgão fiscalizador, com cópia para a Comissão Nacional de Energia, durante o primeiro mês de cada ano, uma relação das instalações postas em serviço durante o ano anterior em sua área de atuação.

8.4.5 – Obrigações do Titular da Instalação

O titular da instalação fotovoltaica é responsável por manter a instalação em perfeitas condições de funcionamento, assim como os aparelhos de proteção e conexão.

8.4.6 – Condições Técnicas de Caráter Geral

As condições de conexão a rede se fixam em função da potência da instalação fotovoltaica, com o objetivo de evitar efeitos prejudiciais aos usuários com cargas sensíveis.

8.4.7– Condições Específicas de Interconexão

Podem-se interconectar instalações fotovoltaicas em baixa tensão sempre que a soma das potências nominais não excedam de 100 kVA.

Se a potencia nominal da instalação fotovoltaica a conectar a rede de distribuição é superior a 5 kW, a conexão da instalação fotovoltaica a rede será trifásica.

A variação de tensão provocada pela conexão e desconexão da instalação fotovoltaica não poderá ser superior a 5%.

8.4.8 – Medição e Faturamento

Quando existam consumos elétricos no mesmo local da instalação fotovoltaica, estes se situarão em circuitos independentes dos circuitos elétricos da instalação fotovoltaica e de seus equipamentos de medição.

As leituras de tais consumos se realizarão por meio de equipamentos próprios e independentes, que servirão de base para faturamento.

A energia elétrica que o titular da instalação fotovoltaica faturará para a empresa distribuidora será a diferença entre a energia elétrica de saída menos a de entrada na instalação fotovoltaica.

8.5 – Pequenos Aerogeradores no Brasil

No Brasil se desconhece algum programa de incentivo para a utilização de pequenos aerogeradores na geração de energia elétrica, seja no campo de financiamento, via instituições financeiras de fomento oficiais, seja através de políticas governamentais via ministérios e agência reguladora. Não existe distinção entre os pequenos e grandes equipamentos.

No Brasil a Aneel classifica como pequeno aerogerador os equipamentos com potência igual ou inferior a 500 kW. Fazendo-se necessário que sejam criados procedimentos no sentido de separar a micro-eólica da grande eólica deixando essas diferenças evidentes, na forma de simplificação de procedimentos.

Como referência tem-se a classificação adotada pela BWEA que considera como pequeno aerogerador os equipamentos com potência igual ou inferior a 50 kW.

Apesar dessa falta de incentivos existe uma incipiente indústria nacional de pequenos aerogeradores, direcionados basicamente para aplicações isoladas que certamente se expandiria com o fomento do uso de pequenos aerogeradores

Como reconhece a Aneel, a geração de energia elétrica próxima aos centros de consumidores é benéfica para o aumento da confiabilidade e estabilidade dos sistemas de transmissão e de distribuição. Contribuindo também para reduzir perdas e aumentar a oferta de energia elétrica em curto espaço de tempo.

A energia elétrica produzida decorrente da disseminação da utilização de pequenos aerogeradores por autoprodutores contribuirá para redução de risco de novas crises de fornecimento de energia elétrica.

A criação de um programa nacional de incentivo do uso de energia alternativa englobando ações no campo do financiamento do valor total da instalação com taxas de juros baixos, longos prazos de financiamento, prazos de carência e rebates para pagamento em dia, no campo de atuação das instituições financeiras governamentais, certamente alavancarão a utilização da energia eólica como fonte de geração de renda e melhoria na competitividade de pequenos empreendimentos.

No campo da regulação por parte da Aneel torna-se necessária a simplificação dos procedimentos exigidos para instalação dos equipamentos bem como a isenções de taxas que são aplicadas hoje indistintamente aos equipamentos, independente do seu tamanho.

A garantia aos fabricantes nacionais da manutenção do mercado interno a ser criado com os incentivos dado aos pequenos autoprodutores levará ao surgimento de uma indústria de pequenos aerogeradores gerando empregos e novas tecnologias.

O Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Luz para Todos é um programa do Governo Federal que objetiva levar energia elétrica para a população do meio rural. Diferencia-se dos programas similares que existiam anteriormente por que no Luz Para Todos, o beneficiado não tem que pagar pela construção das linhas, o que anteriormente era obrigado a fazer. A ligação da luz pelo Programa Luz Para Todos, para os domicílios de baixa renda, é agora gratuita.

O Programa é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia com participação da Eletrobrás e de suas empresas controladas. A ligação da energia elétrica até os domicílios é gratuita.

As famílias sem acesso à energia estão majoritariamente nas localidades de menor Índice de Desenvolvimento Humano e nas famílias de baixa renda. Cerca de 90% destas famílias têm renda inferior a três salários-mínimos e 80% estão no meio rural.

Por isso, o objetivo do Programa é levar a energia elétrica a estas comunidades para que elas a utilizem como vetor de desenvolvimento social e econômico, contribuindo para a redução da pobreza e aumento da renda familiar.

Além disso, a chegada da energia elétrica facilita a integração de outros programas sociais, como o acesso a serviços de saúde, educação, abastecimento de água e esgotamento sanitário [48].

O *Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Luz para Todos* basicamente é uma ligação de energia elétrica para qualquer família residente na área rural, com a instalação de um ponto de luz por cômodo (no máximo três cômodos), e duas tomadas, podem ser solicitadas à concessionária de distribuição de energia elétrica ou à cooperativa de eletrificação rural que atende ao município [49].

Sendo detectado um potencial eólico para a produção de energia elétrica em determinado local para a instalação de pequenos aerogeradores, a utilização da infra-estrutura criada pelo *Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Luz para Todos* para levar energia elétrica ao local poderá ser complementada transformando o consumidor em um pequeno produtor de energia elétrica.

NONO CAPÍTULO – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

9.1 – Conclusões

A utilização dos pequenos aerogeradores em locais com melhor disponibilidade de vento que o de Olinda terá um retorno do investimento em bem menor tempo, como exemplo pode-se citar a região litorânea dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará.

Para o usuário a aplicação do perfil energético local (PEL) associado ao coeficiente de potência dos aerogeradores facilitará a escolha do aerogerador mais adequado.

Para o projetista o uso do PEL servirá de parâmetro para otimizar o desempenho de novos aerogeradores que atendam de forma mais eficiente as exigências locais.

A seleção final do aerogerador foi determinada pela premissa de fixar o mesmo valor do empreendimento para todos os equipamentos. É provável que, em virtude de se tratar de um equipamento importado, o seu valor final venha a ser superior ao de fabricação nacional, o que poderá levar a uma alteração no equipamento inicialmente selecionado

Com a utilização do coeficiente de potência dos aerogeradores as velocidades de partida (*cut-in*) e de saída (*cut-out*) já estão computadas.

Os dados dos equipamentos utilizados nesse trabalho são para efeito demonstrativo dos procedimentos propostos necessitando que as curvas e coeficientes utilizados em aplicação prática sejam certificados por uma instituição credenciada para tal fim.

Os dados de ventos utilizados nesse trabalho servem apenas como objeto de estudo acadêmico. No momento atual as medições de vento, recomendadas para empreendimentos eólicos, deverão ter médias de velocidade e direção a cada 10 minutos e os sensores instalados a uma altura de 50 metros ou na altura do rotor do aerogerador.

Das informações coletadas e apresentadas de forma condensada nos capítulos anteriores pode-se inferir que já é chegado o momento de se promover no país o uso de pequenos aerogeradores para a produção de energia elétrica como um instrumento de geração de renda e melhoria da competitividade de pequenos empreendimentos.

9.2 - Recomendações

O levantamento do PEL com dados levantados no intervalo de um segundo e sua comparação em tempo real com a energia produzida por um aerogerador, ajudará a esclarecer a discrepância encontrada para as energia previstas pelo método de Weibull e o fornecido pelo programa Windographer.

As informações e os resultados apresentados apontam para a necessidade de uma política governamental que promova a facilidade nas linhas de financiamento para a aquisição e instalação desses equipamentos. Outro aspecto importante é o estabelecimento de regras diferenciadas para a utilização de pequenos aerogeradores, tanto no sistema de medição adotado como na simplificação e definição de regras para o seu licenciamento e uso.

Apesar de se tratar de regras para as instalações de sistemas fotovoltaicos, o modelo espanhol adotado para instalações fotovoltaicas com potência inferior a 100 kVA, com as devidas adaptações e adequações, poderá servir como referência na criação de normas especiais para a utilização do uso de pequenos aerogeradores conectados na rede de distribuição elétrica no Brasil.

Outra possibilidade de utilização da energia eólica na forma estudada neste trabalho será o uso de equipamentos de maior porte para condomínios. Grupos de pessoas ou empresas adquirem e instalam o equipamento para a autoprodução. Esta aplicação demanda o levantamento dos recursos eólicos na área urbana, visto que os dados disponíveis nos atlas eólicos atendem a esse fim, com limitações.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SEN, Z., **Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy**, Springer, 2008.
- [2] EPE, *Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007*, EPE, 2008.
- [3] <http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2000/chuva/ChuvaAcida.htm>. Acessado em 07/10/2008.
- [4] PNUD, *Relatório do Desenvolvimento Humano 2007/2008*. ONU – PNUD.
- [5] ONU, *World Energy Assessment: Overview 2004 Update*.
- [6] KERR, T., *A New Method for Calculating the Environmental Benefits of Clean Energy* *Environmental Benefits of Clean Energy Technologies*, NREL, 2002.
- [7] LYSEN, E. H., *Introduction to Wind Energy*, SWD Publications, 1983.
- [8] HAU, E., *Wind Turbines*, Springer, 2006.
- [9] BURTON, T., et al. *Wind Energy Handbook*, Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [10] COCHRAN, B. C., *The Influence of Atmospheric Turbulence on the Kinetic Energy Available During Small Wind Turbine Power Performance Testing*, CEDER-CIEMAT, Spain. 2002.
- [11] WEGLEY, H. L. et al, *A Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems*, US-DOE, 1980.
- [12] CASTRO, R. M. G., *Introdução a Energia Eólica*, IST, 2007.
- [13] PATEL, M. R., *Wind and Solar Power Systems*, U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, 1999.
- [14] CASTRO, Rui M. G., Ferreira J., *Equipamentos Elétricos dos Geradores Eólicos*, Universidade Técnica de Lisboa, 2004.
- [15] THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, USA, *Environmental Impacts of Wind-Energy Projects*, 2007.
- [16] ERICKSON, et.al, *Summary of Anthropogenic Causes of Bird Mortality*, 2002.
- [17] ENERGY COMMISSION, California Department of Fish and Game, *Statewide Guidelines for Reducing Impacts to Birds and Bats from Wind Energy Development*. 2006.
- [18] ZHU, W. J., *Modelling of Noise from Wind Turbines*, DTU, 2004.
- [19] ROGERS, A.L., Manwell, J. F., Wright, S., *Wind Turbine Acoustic Noise*, Renewable Energy Research Laboratory, 2006.
- [20] HAILES, D., **Practical Challenges of Building Mounted Wind Turbines**, Warwick Wind Trials Open Days - Warwick District Council.
- [21] BWEA, *Noise from Wind Turbines, The Facts*. BWEA, 2000.

- [22] POMILIO, J. A. - *Qualidade da Energia Elétrica e Eletrônica de Potência* – Univ. Campinas, 2002.
- [23] LARSSON, Å. - *The Power Quality of Wind Turbines* - Chalmers University of Technology, 2000.
- [24] ANEEL - *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*, 2008.
- [25] ARIZONA PUBLIC SERVICE CO., *Interconnection Requirements for Distributed Generation*, 2006.
- [26] <http://www.baywinds.com/new/Inverter.htm>, acessado em 16/12/2008
- [27] Fact Sheet: *Utility-Scale Wind Energy*, Appalachian State University, 2007.
- [28] KROLAK, R., *Aerographer's Mate - Module 5—Basic Meteorology*, Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, 252 pp, 2001.
- [29] LOBO, P. R. V. e SOARES, C. A. – *Meteorologia e Oceanografia* – DHN. 465 pp., 2007.
- [30] AHRENS, C. D., *Essential of Meteorology*, Thomson, Brook/Cole, 454 pp., 2000.
- [31] MATHEW, S. *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer, 246 pp., 2006.
- [32] EMEIS, S., Türk, M. – *Comparison of Logarithmic Wind Profiles and Power Law Wind Profiles and their Applicability for Offshore Wind Profiles* – Wind Energy Colloquium Proceedings of the Euromech – Springer, 2007 363 pp.
- [33] MELO, G. M., Araújo, A. M., *Simulação da Produção de Energia Elétrica com Turbinas Eólicas de Pequeno Porte em Regime de Ventos de Olinda/BR*, Anais do 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, CDroom, 2007.
- [34] ARAÚJO, A. M., Melo, G. M., Medeiros, A.L.R., Santos, M. J. *Simulación de la Producción de Energía Eléctrica con Aerogeneradores de Pequeño Tamaño*. Información Tecnológica, v. 20, n.3, 2009.
- [35] VERGNET SA - http://www.vergnet.fr/Commun/tele/EN/Eole/GEV_6-5_EN.pdf. Acessada em 24/05/2007.
- [36] WESTWIND WIND TURBINES, <http://www.westwind.com.au/turbines/5kw.htm>, Acessada em 24/05/2007.
- [37] EOLTEC WIND TURBINES - http://www.eoltec.com/English/Main_en.htm – Acessada em 24/05/2007.
- [38] ENERSUD, <http://www.enersud.com.br/produtos.asp> - Acessada em 12 de janeiro de 2009
- [39] ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica, [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) – Acessada em 26/05/2007.

- [40] CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, <http://www.cresesb.cepel.br> - Acessada em 24/05/2007.
- [41] CELPE - Companhia de Eletricidade de Pernambuco, Grupo Neoenergia, <http://www.celpe.com.br>. Acessada em 23/10/2008.
- [42] MOTA, R.R., CALOBA, G.M., Análise de Investimentos, ATLAS, 2002, 392pp
- [43] BNDES, <http://www.bndes.gov.br/programas/programas.asp#outro>. Acessada em 23/10/2008.
- [44] <http://www.awea.org/smallwind/> - Acessada em 19/11/2008.
- [45] AWEA - *Frequently Asked Questions About Net Metering* – Wind Energy Fact Sheet.
- [46] ARRIBAS, L. - *Microgeneración y Pequeños Aerogeneradores* – CIEMAT, 2007.
- [47] http://www.bwea.com/media/news/articles/small_wind_systems_80_annual_g.html - Acessada em 19/11/2008.
- [48] http://www.mme.gov.br/programs_display.do?prg=8. Acessada em 19/11/2008
- [49] http://pt.wikipedia.org/wiki/Luz_Para_Todos - Acessada em 19/11/2008.

Anexo A

Distribuição média mensal da temperatura e velocidades
de vento no ano de 1998

Distribuição média mensal da temperatura e velocidades de vento no ano de 1998

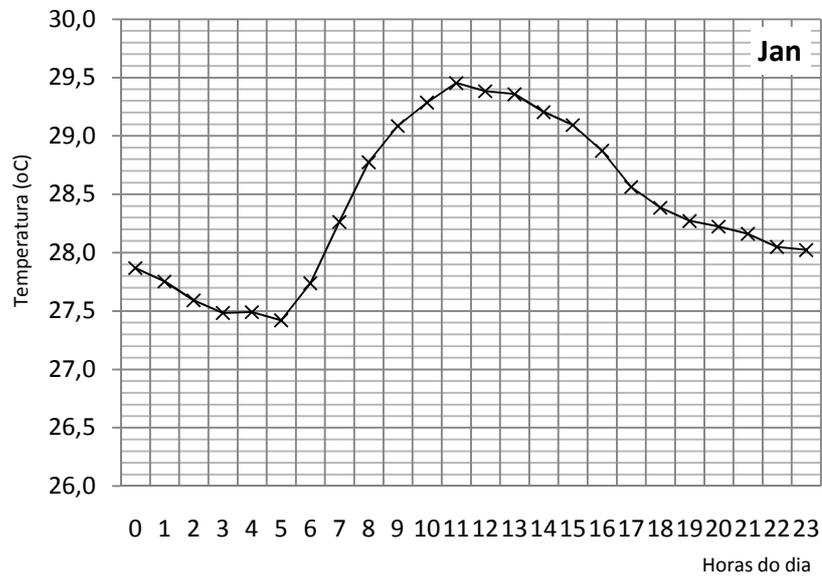


Figura 1 – Variação horária de temperatura (janeiro 1998)

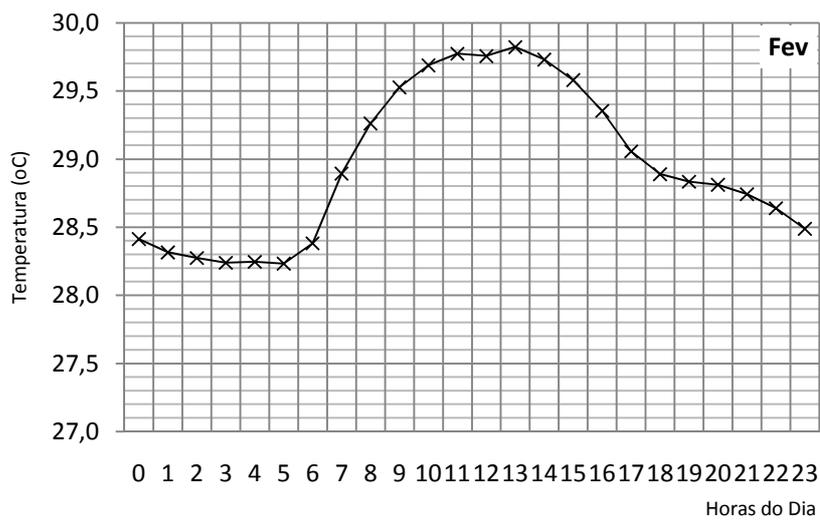


Figura 5.18 – Variação horária de temperatura (fevereiro 1998)

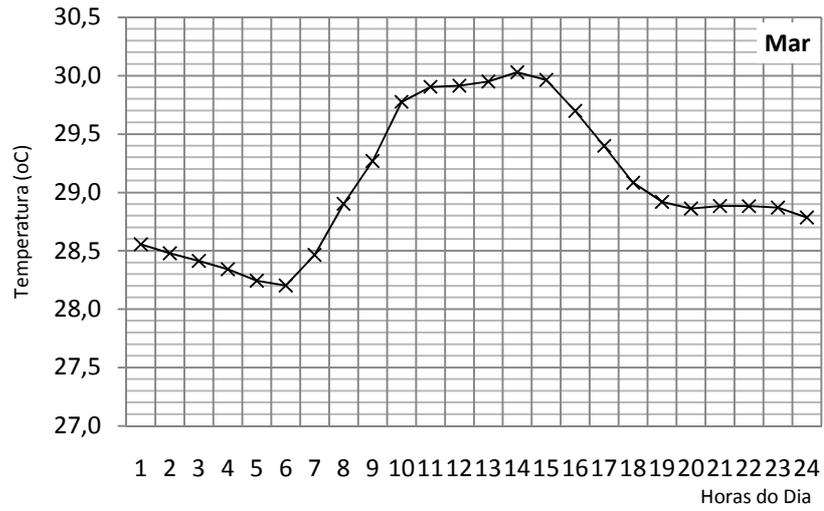


Figura 5.19 – Variação horária de temperatura (março 1998)

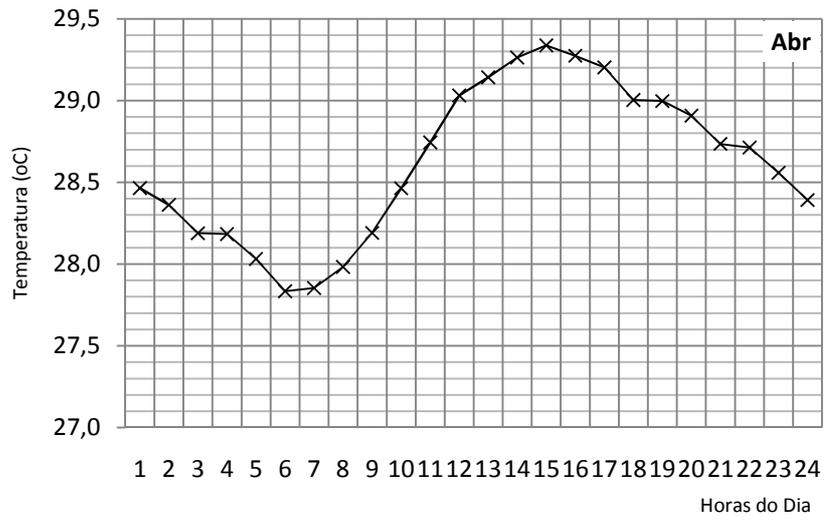


Figura 5.20 – Variação horária de temperatura (abril 1998)

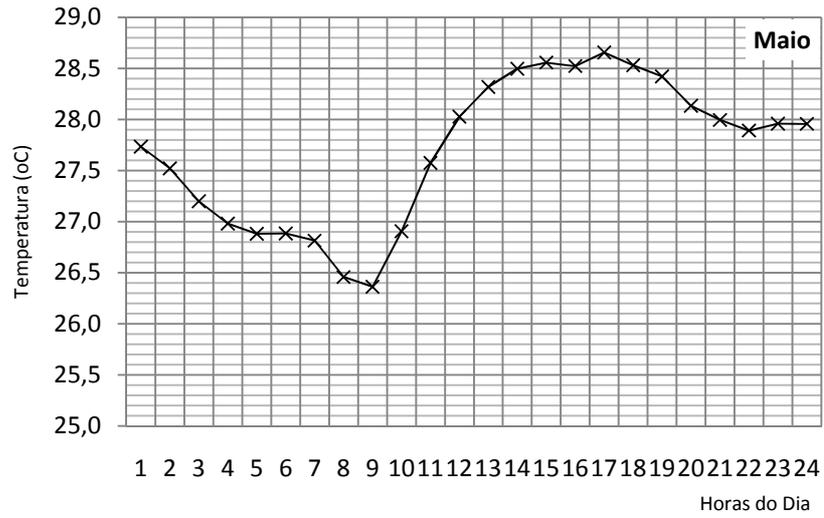


Figura 5.21 – Variação horária de temperatura (maio 1998)

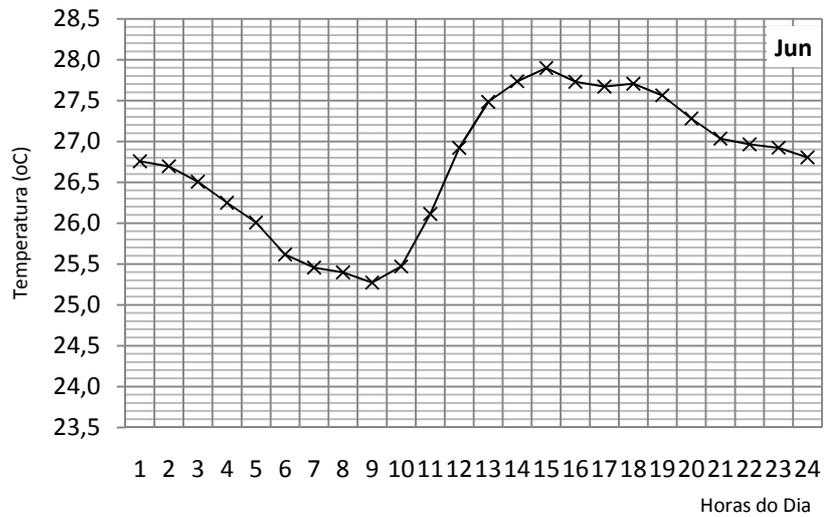


Figura 5.22 – Variação horária de temperatura (junho 1998)

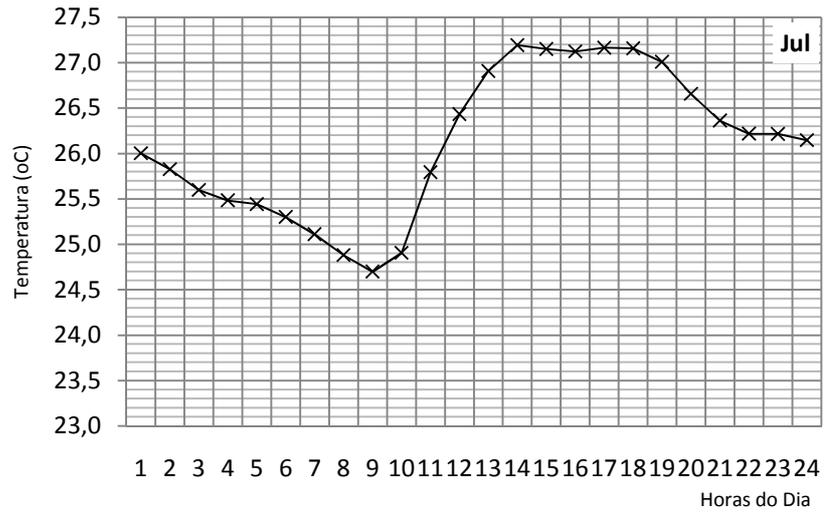


Figura 5.23 – Variação horária de temperatura (julho 1998)

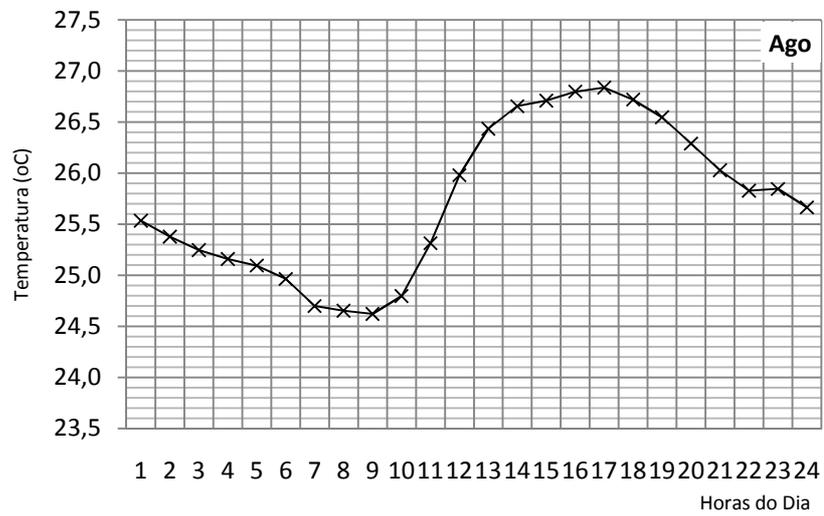


Figura 5.24 – Variação horária de temperatura (agosto 1998)

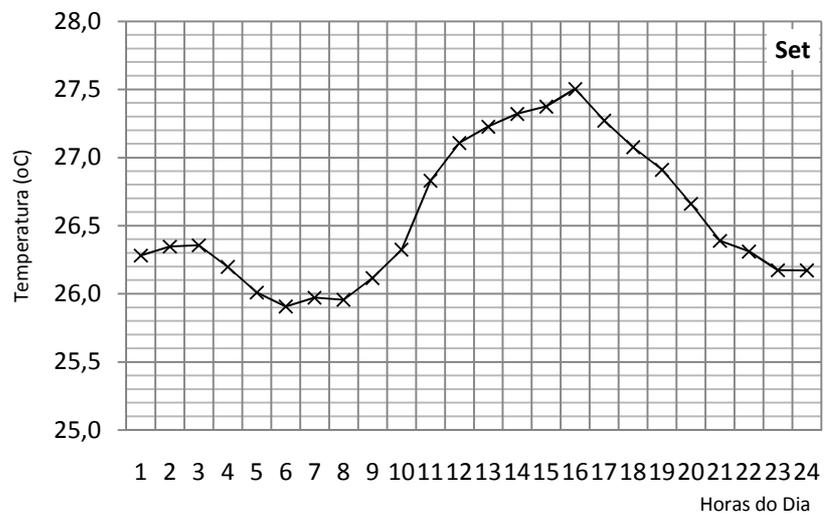


Figura 5.25 – Variação horária de temperatura (setembro 1998)

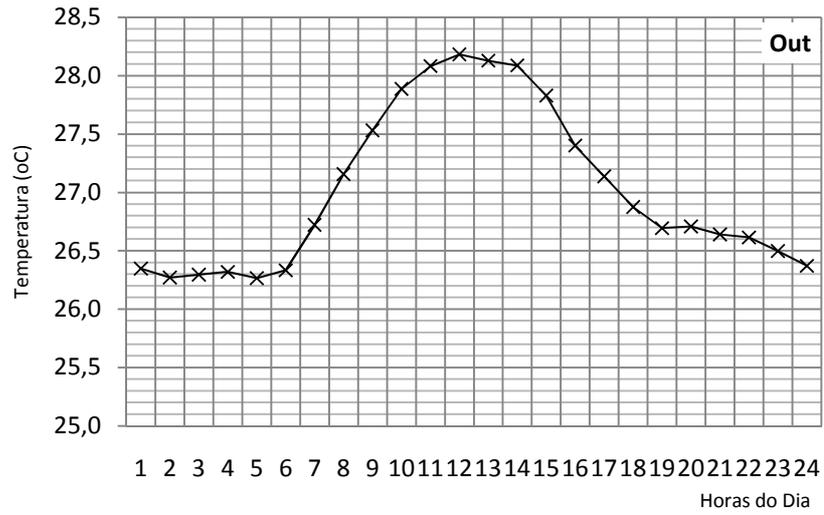


Figura 5.26 – Variação horária de temperatura (outubro 1998)

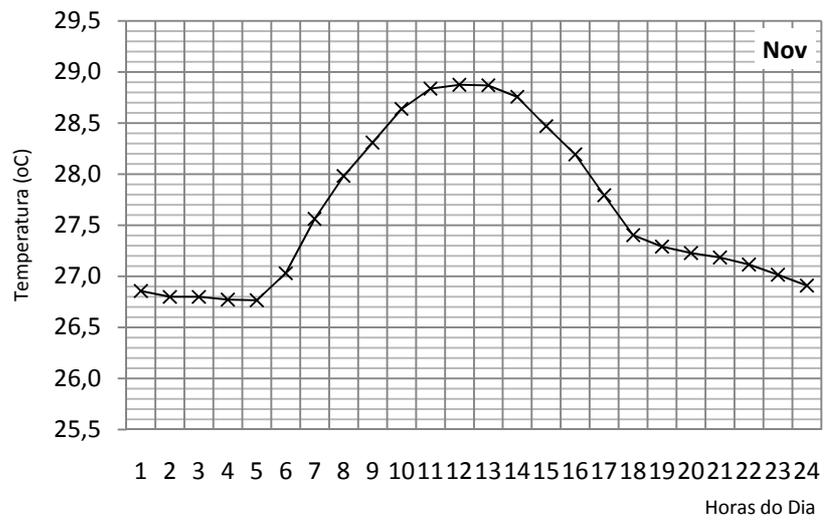


Figura 5.27 – Variação horária de temperatura (novembro 1998)

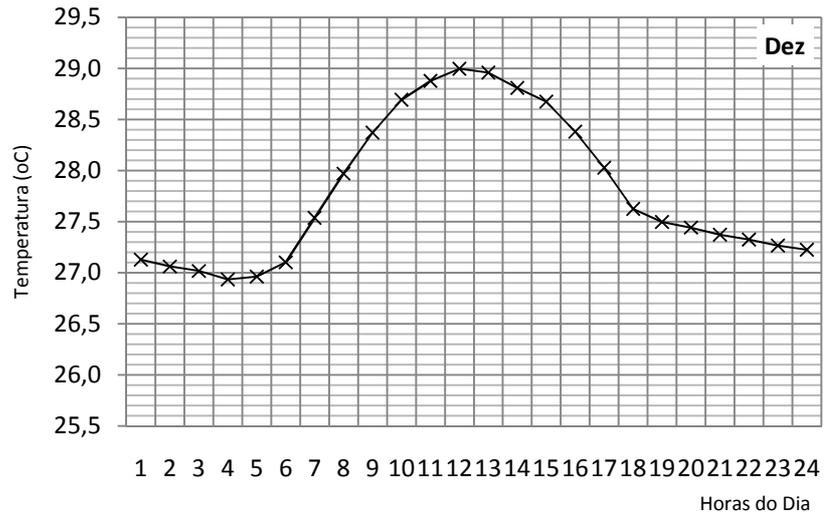


Figura 5.28 – Variação horária de temperatura (dezembro 1998)

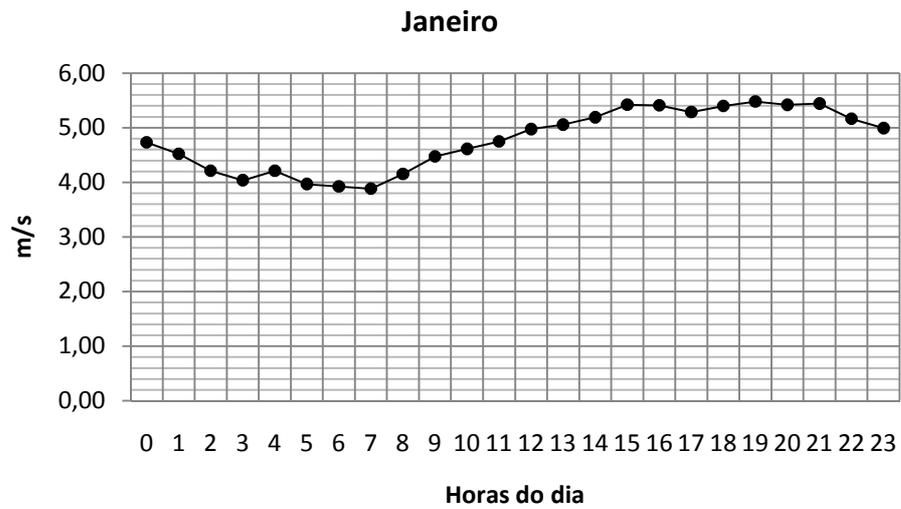


Figura 5.5 – Variação horária da velocidade do vento (janeiro 1998)

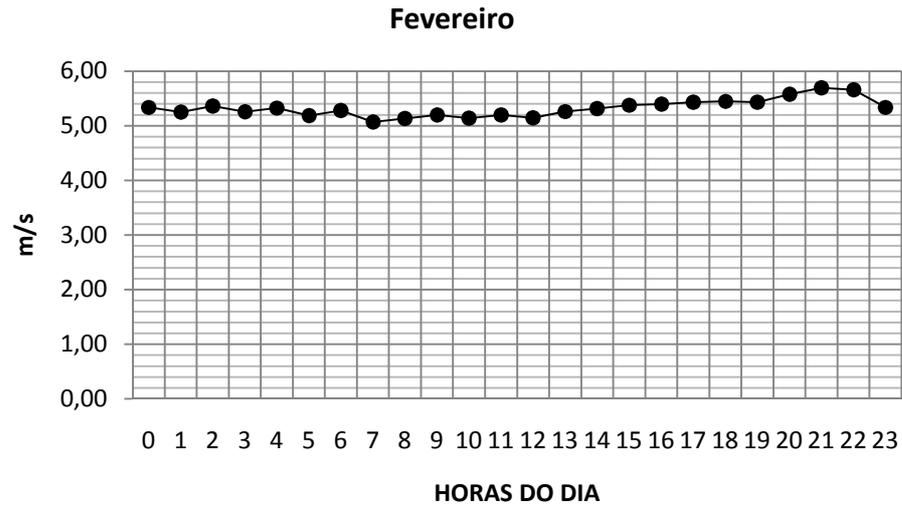


Figura 5.6 – Variação horária da velocidade do vento (fevereiro 1998)

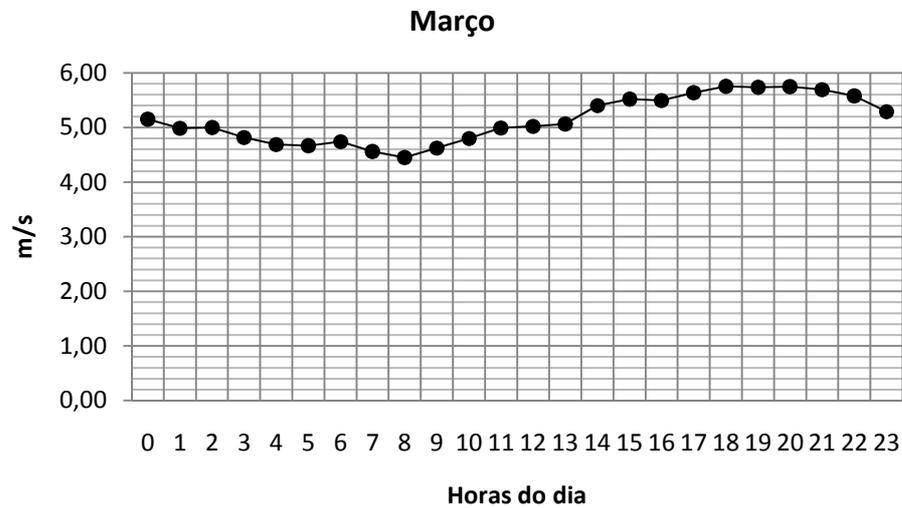


Figura 5.7 – Variação horária da velocidade do vento (março 1998)

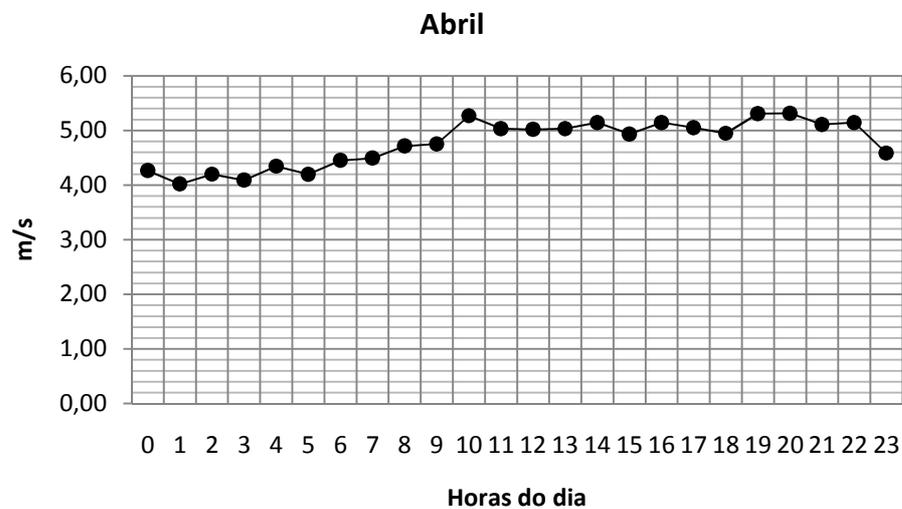


Figura 5.8 – Variação horária da velocidade do vento (abril 1998)

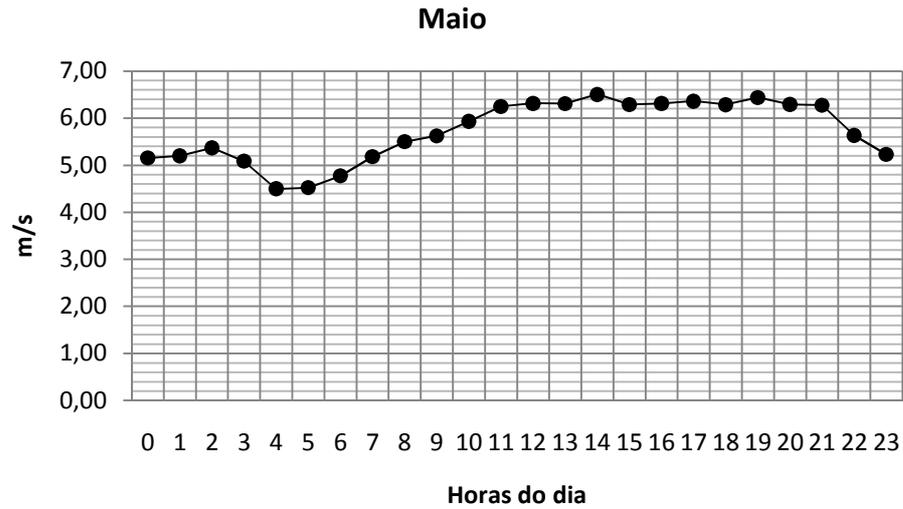


Figura 5.9 – Variação horária da velocidade do vento (maio 1998)

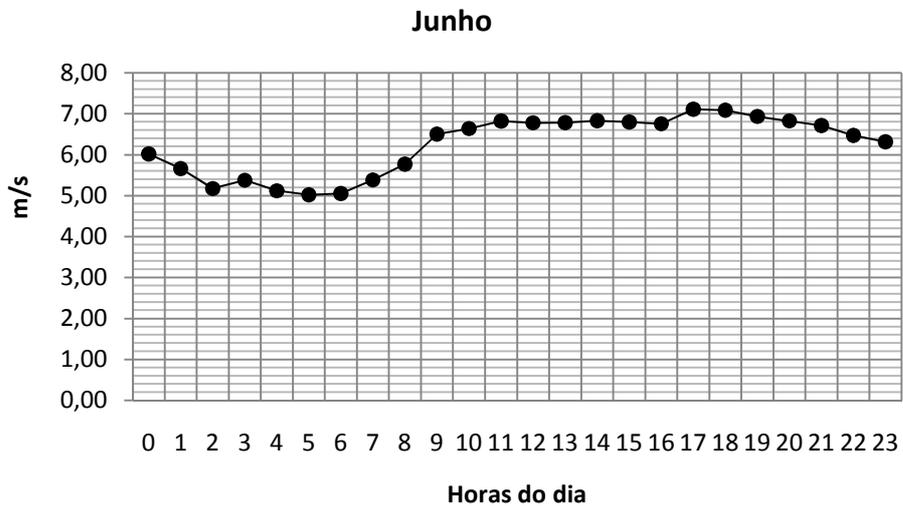


Figura 5.10 – Variação horária da velocidade do vento (junho 1998)

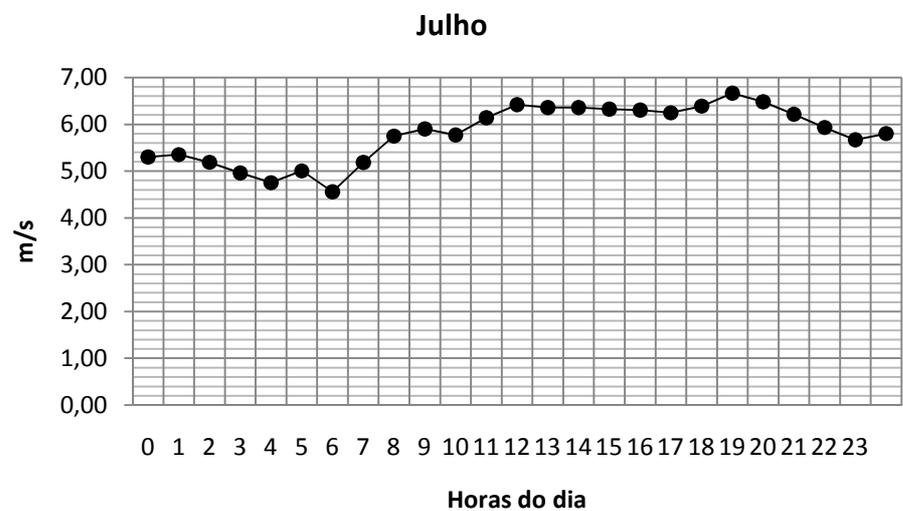


Figura 5.11 – Variação horária da velocidade do vento (julho 1998)

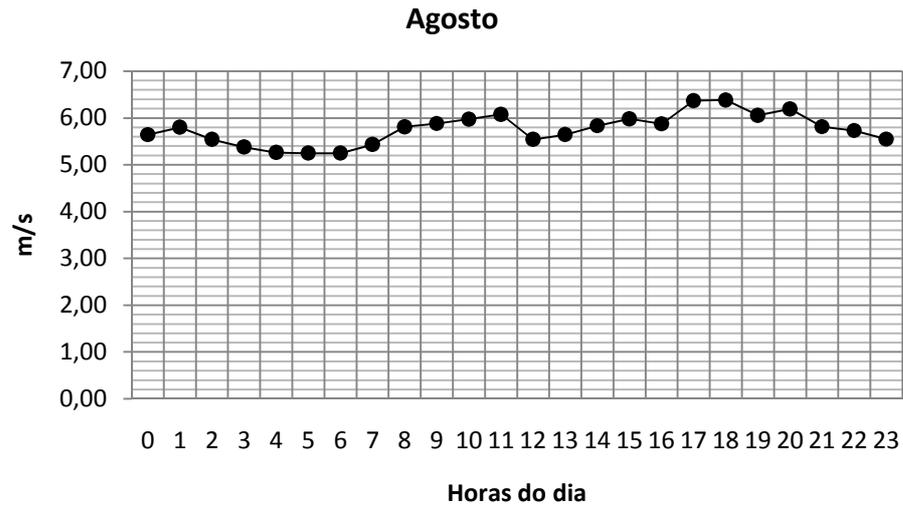


Figura 5.12 – Variação horária da velocidade do vento (agosto 1998)

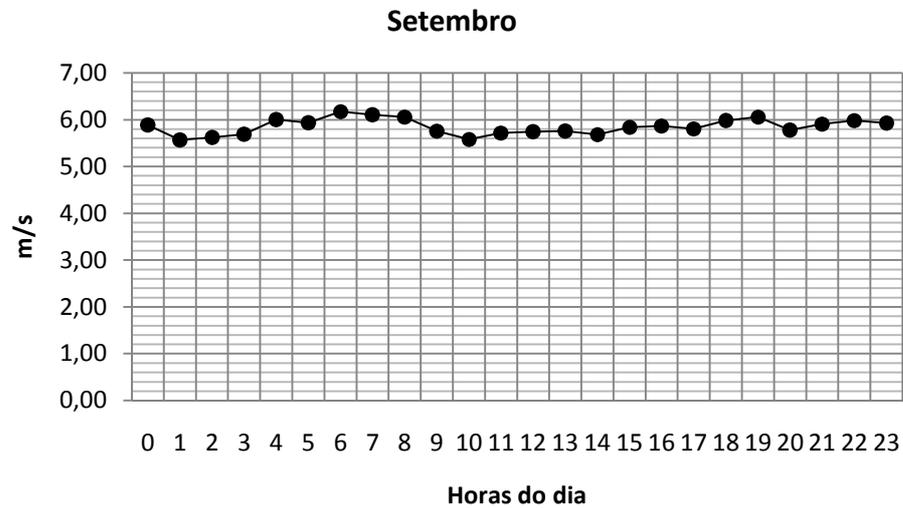


Figura 5.13 – Variação horária da velocidade do vento (setembro 1998)

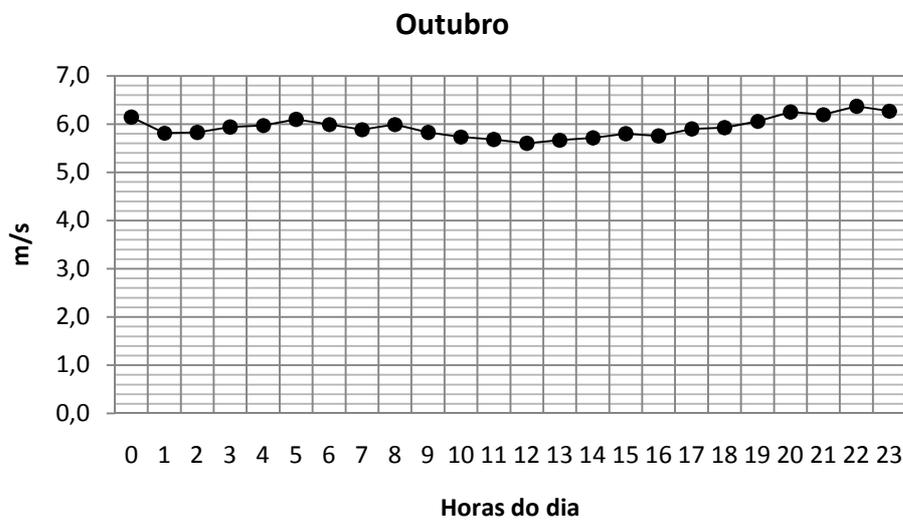


Figura 5.14 – Variação horária da velocidade do vento (outubro 1998)

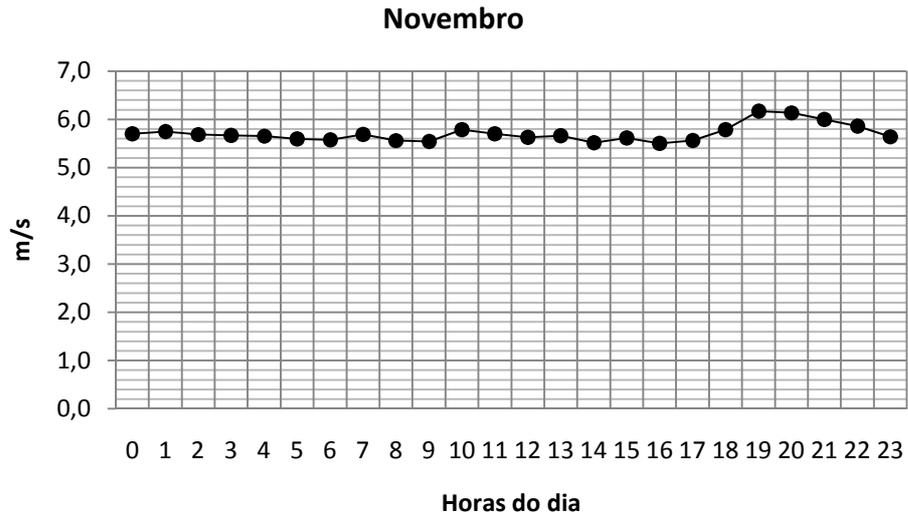


Figura 5.15 – Variação horária da velocidade do vento (novembro 1998)



Figura 5.16 – Variação horária do vento (dezembro 1998)