



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ILDER BASTOS DOS SANTOS

DESEMPENHO DE UM
SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO
OPERANDO COM PEQUENAS CARGAS

Natal

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ILDER BASTOS DOS SANTOS

**DESEMPENHO DE UM
SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO
OPERANDO COM PEQUENAS CARGAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenções de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Wilson Lage Nogueira

Natal
2007

ILDER BASTOS DOS SANTOS

**DESEMPENHO DE UM
SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO
OPERANDO COM PEQUENAS CARGAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenções de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Wilson Lage Nogueira

Banca Examinadora

Orientador – Prof. José Wilson Lage Nogueira, Dr.
DEM/ UFRN

Examinador – Prof. Ângelo Roncalli Oliveira Guerra, Dr.
DEM/ UFRN

Examinador – Prof. Mário Cezar Alves da Silva, Dr.
DTMM/ CEFET-BA

*Ó Voltaire!
Ó humanidade!
Ó imbecilidade!*
*A “verdade”, a busca da verdade não é coisa fácil;
e se no caso o homem se porta humanamente demais
- “il ne cherche le vrai que pour que faire lê bien”
[só busca o vero para fazer o bem] -,
aposto que ele nada encontra!*

(NIETZSCHE. Além do bem e do mal.)

Dedico aos meus pais
Salvelino (*in memoriam*) e Olívia,
que me deram vida.

AGRADECIMENTOS

À UFRN e ao CEFET-BA e, especialmente, ao Departamento de Engenharia Mecânica que me proporcionaram a oportunidade para elaborar esta dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Wilson Lage Nogueira, por ter acreditado em mim e auxiliado na elaboração e êxito deste trabalho. Obrigado!

Aos professores do PPGEM, pelas valiosas contribuições oferecidas.

Aos colegas do LABDTE, pelo convívio e apoio.

Ao meu filho Vinícius, por ter compreendido a minha ausência como pai em diversas situações.

À Adelita minha esposa, companheira e amiga motivadora nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos, Ilo, Iloir e Marli, obrigado pela compreensão.

Aos amigos Edson, João Dantas, Fernando e demais colegas, pelo estímulo intelectual.

A todos, quantos, amigos e colegas, que contribuíram anonimamente para a realização deste projeto.

RESUMO

Sistemas híbridos de conversão de energia são aqueles que possibilitam a combinação de mais de uma fonte, por exemplo, eólica, solar e diesel, e a utilização opcional de sistemas de armazenamento de energia. São sistemas para a geração de eletricidade que utilizam fontes renováveis de energia, com mínimo impacto ambiental, e representam uma contribuição energética cada vez mais significativa, sendo relevante conhecer detalhes e o comportamento dos mesmos. Esses sistemas apresentam viabilidade técnica e econômica para locais distantes da rede de distribuição elétrica convencional e para os locais remotos, ou seja, aqueles não abastecidos pela rede elétrica convencional. Essa dissertação concentra-se na montagem, e instalação da parte fotovoltaica e na análise experimental de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte, com armazenamento em baterias. O sistema híbrido eólico-fotovoltaico foi montado no Laboratório de Dispositivos Térmicos Especiais (LABDTE). O sistema híbrido experimental é composto de 01 aerogerador de 750 W de potência nominal; 04 painéis fotovoltaicos de 80 W de potência nominal cada um; 04 baterias de descarga profunda com capacidade de 105 Ah cada uma; 02 controladores de carga, um para o sistema eólico e outro para o sistema fotovoltaico; 01 inversor DC/AC; 01 piranômetro para medir a radiação solar; 01 anemômetro de conchas. Os dados experimentais contidos neste trabalho possibilitaram a análise do comportamento das fontes eólica e solar, bem como permitiram o cálculo da energia gerada pelo sistema híbrido de pequeno porte utilizado, e a determinação do seu desempenho.

Palavras-chave: Solar-fotovoltaica. Energia eólica. Sistemas híbridos.

ABSTRACT

Hybrid systems of energy conversion are those that make possible the combination of more than one source, for example: Wind, solar and diesel, and the optional utilization of systems for energy storage. They are systems for electricity generation which use renewable sources of energy, with minimum environmental impact, and represent an energetic contribution more and more significative, being relevant to know their details and behavior. Those systems present technical and economical viability to places that are far from the conventional electric distribution systems. This dissertation centralizes in the mounting, and installation of the photovoltaic part and in the experimental analysis from an Wind photovoltaic hybrid system of small port, with battery storage. The Wind photovoltaic hybrid system was assembled in the laboratory of special termic dispositivo (LABDTE). The experimental hybrid system is composed by: One 750 W aero-generator, four photovoltaic panels (80W each), four batteries of intense discharge with capacity of 105 Ah each one, two charge controllers, one to the Wind system and the other to the photovoltaic system; one convertor DC/AC; one "piranometer" to measure the solar rays; one conch anemometer. The experimental data contained in this work made possible the analysis of the solar and Wind sources behavior, as well as allowed the calculation of the energy generated by the small port hybrid system used, and the determination of its performance.

Keywords: Solar-photovoltaic. Wind energy. Hybrid systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Trajectoria da Terra em torno do Sol	25
Figura 2	Espectro de radiação solar	26
Figura 3	Piranômetro	27
Figura 4	Heliógrafo	28
Figura 5	Fotocélula	33
Figura 6	Gráfico tensão x corrente	35
Figura 7	Circuito equivalente simplificado da célula solar	37
Figura 8	Circuito equivalente da célula solar	37
Figura 9	Comportamento da potência de um módulo fotovoltaico	39
Figura 10	Conexão de diodos de <i>bypass</i> nos módulos fotovoltaicos	40
Figura 11	Ventos de montanhas e vales	45
Figura 12	Curva característica de uma turbina eólica	46
Figura 13	Efeito da turbulência. Vista lateral	49
Figura 14	Efeito da turbulência. Vista superior	49
Figura 15	Distribuição de pressão antes e depois do rotor	51
Figura 16	Anemômetro de conchas	52
Figura 17	Ângulo de incidência solar	55
Figura 18	Redução da velocidade do vento no rotor	62
Figura 19	Gráfico de P/P_0 em função de v_2/v_1	64
Figura 20	Curva de potência de uma turbina eólica	64
Figura 21	Turbina eólica	72
Figura 22	Módulo fotovoltaico	73
Figura 23	Especificações elétricas	74
Figura 24	Especificações físicas	74
Figura 25	Características de tensão e corrente dos módulos fotovoltaicos KC80 em várias temperaturas de células	75

Figura 26	Características de voltagem e corrente dos fotovoltaicos em vários níveis de radiação	75
Figura 27	Banco de baterias	77
Figura 28	Controlador de carga e inversor	78
Figura 29	Anemômetro e sensor direcional	78
Figura 30	Detalhe do sensor direcional	79
Figura 31	Piranômetro	79
Figura 32	Registrador de dados	80
Figura 33	Painel fotovoltaico: suporte dos anéis	81
Figura 34	Painel fotovoltaico: regulador de ângulo horizontal	81
Figura 35	Painel fotovoltaico: anel regulador das mãos francesas	81
Figura 36	Painel fotovoltaico: montagem do regulador de ângulo	82
Figura 37	Painel instalado no LABDTE	83
Figura 38	Painel instalado no LABDTE	83
Figura 39	Esquema de instalação do sistema híbrido	84
Figura 40	Velocidade do vento	86
Figura 41	Potência eólica disponível	87
Figura 42	Velocidade do vento	87
Figura 43	Potência eólica disponível	88
Figura 44	Painéis fotovoltaicos com sombreamento momentâneo	89
Figura 45	Monitoramento das tensões no dia 28/06/2007	89
Figura 46	Monitoramento das tensões no dia 03/07/2007	90
Figura 47	Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 29/06/2007	91
Figura 48	Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 13/08/2007	91
Figura 49	Monitoramento das tensões no dia 13/08/2007	92
Figura 50	Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 14/08/2007	92
Figura 51	Monitoramento das tensões no dia 14/08/2007	93
Figura 52	Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 15/08/2007	94
Figura 53	Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 15/08/07	94
Figura 54	Monitoramento das tensões no dia 15/08/2007	95

Figura 55	Monitoramento das tensões no dia 16/08/2007	96
Figura 56	Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 16/08/2007	97
Figura 57	Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 16/08/2007	97
Figura 58	Monitoramento das tensões no dia 17/08/2007	98
Figura 59	Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 17/08/2007	99
Figura 60	Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 17/08/2007	99
Figura 61	Monitoramento das tensões no dia 18/08/2007	100
Figura 62	Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 18/08/2007	100
Figura 63	Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 18/08/2007	101
Figura 64	Monitoramento das tensões no dia 19/08/2007	101
Figura 65	Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 19/08/2007	102
Figura 66	Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 19/08/2007	102
Figura 67	Energia gerada no período 13/08 a 19/08/2007	103
Figura 68	Percentual de energia gerada no período de 13/08 a 19/08/2007	104
Figura A1	Sombra da torre sobre dois módulos fotovoltaicos	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Condições padrão para a definição do comportamento de um módulo fotovoltaico	39
Tabela 2	Rendimento das diferentes tecnologias	42
Tabela 3	Ventos dominantes devido à movimentação global	43
Tabela 4	Classes e comprimentos de rugosidade	60
Tabela 5	Densidade de potência em função da velocidade do vento	66
Tabela 6	Custo do sistema híbrido	85
Tabela 7	Monitoramento das tensões no dia (04/7/07)	88
Tabela 8	Energia gerada diariamente	103
Tabela 9	Percentual de energia gerada diariamente	103
Tabela B1	Medidas da tensão em função do tempo no dia 28/08/2007	110
Tabela B2	Medidas da tensão em função do tempo no dia 29/08/2007	110
Tabela C1	Monitoramento das tensões no dia (03/07/2007)	111
Tabela C2	Monitoramento das tensões no dia (28/07/2007)	111
Tabela C3	Monitoramento das tensões no dia (29/06/2007)	112
Tabela C4	Monitoramento das tensões no dia (28/06/2007)	112
Tabela C5	Monitoramento das tensões no dia (03/07/2007)	113
Tabela C6	Tensão no BB e tensão gerada pelo painel fotovoltaico no dia 13/08/2007	114
Tabela C7	Tensão no BB e tensão gerada pelo painel fotovoltaico no dia 14/08/2007	114
Tabela C8	Tensão no BB e tensão gerada pelo painel fotovoltaico no dia 15/08/2007	115
Tabela C9	Tensão no BB e tensão gerada pelo painel fotovoltaico no dia 16/08/2007	115
Tabela C10	Tensão no BB e tensão gerada pelo painel fotovoltaico no dia 17/08/2007	116
Tabela C11	Tensão no BB e tensão gerada pelo painel fotovoltaico no dia 18/08/2007	117
Tabela C12	Tensão no BB e tensão gerada pelo painel fotovoltaico no dia 19/08/2007	118
Tabela C13	Tensão no BB e tensão gerada pelo aerogerador no dia 23/08/2007	119
Tabela D1	Fonte solar em 13/08/2007	120
Tabela D2	Fonte solar em 14/08/2007	121

Tabela D2	Fonte eólica em 14/08/2007	121
Tabela D3	Fonte solar em 14/08/2007	121
Tabela D4	Fonte eólica em 15/08/2007	122
Tabela D5	Fonte solar em 15/08/2007	122
Tabela D6	Fonte eólica em 16/08/2007	123
Tabela D7	Fonte solar em 16/08/2007	124
Tabela D8	Fonte eólica em 17/08/2007	125
Tabela D9	Fonte solar em 17/08/2007	125
Tabela D10	Fonte eólica em 18/08/2007	125
Tabela D11	Fonte solar em 19/08/2007	126
Tabela D12	Fonte eólica em 19/08/2007	126
Tabela D13	Fonte solar em 14/08/2007	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Massa de ar
CdTe	Telureto de cádmio
CEPEL	Centro de Pesquisa em Energia Elétrica
CIGS	Cobre, índio, gálio, selênio
CIS	Cobre, índio, selênio
CMT	Corte por mínima tensão
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DTE	Dispositivos Térmicos e Especiais
LABDTE	Laboratório de Dispositivos Térmicos e Especiais
LVD	<i>Low Voltage Disconnection</i>
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
PbO ₂	Peróxido de chumbo
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère	[A]
Ah	Ampère hora	[Ah]
Amod	Área do módulo fotovoltaico	[m ²]
AM	Massa de Ar	[-]
Cd	Capacidade	[Ah]
F	Área da seção exposta ao vento	[m ²]
G	Irradiância global	[W/m ²]
Hd	Radiação solar difusa diária, média mensal	[W/m ²]
Hg	Mercurio	[-]
Hh	Radiação solar total diária, média mensal	[W/m ²]
Ho	Radiação solar extraterrestre diária, média mensal	[W/m ²]
if	Corrente fotogerada	[A]
I	Corrente elétrica	[A]
Iass	Corrente da associação em série	[A]
Ic	Corrente da célula fotovoltaica	[A]
Im	Corrente de potência máxima	[A]
Io	Corrente reversa de saturação	[A]
Isc1	Corrente de curto-circuito p/ Irradiância G1	[A]
Isc2	Corrente de curto-circuito p/ Irradiância G2	[A]
k	Constante de Boltzmann	[-]
Kt	Índice de transmitância atmosférica	[-]
m	Fator de idealidade	[-]
P	Potência	[W]
Pb	Chumbo	[-]
Pm	Ponto de potência máxima	[-]
Pv	Pressão atmosférica	[mm de Hg]
Rp	Resistência em paralelo	[ohm]

Rs	Resistência em série	[ohm]
T	Temperatura do ar	[K]
Tc	Temperatura absoluta da célula	[K]
Td	Tempo de descarga	[h]
V	Volt	[V]
Vm	Tensão de potência máxima	[V]
β	Ângulo de Inclinação	[°]
η	Eficiência da célula fotovoltaica	[-]
δ	Declinação	[°]
Γ	Função Gamma	[-]
ω_s	Ângulo de pôr-do-sol	[°]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo geral	19
1.2	Objetivos específicos	20
1.3	Justificativa	20
1.4	Escopo da dissertação	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Energias renováveis	23
2.2	Energia solar	23
2.2.1	Radiação solar	24
2.2.2	Captação e conversão	24
2.2.3	Solarimetria e instrumentos de medição	26
2.3	Energia solar fotovoltaica	28
2.3.1	Histórico do efeito fotovoltaico	29
2.3.2	Princípio de funcionamento	30
2.3.3	Barreira de potencial	30
2.3.4	Células fotovoltaicas	33
2.3.5	Influência da temperatura	34
2.3.6	Aplicações	35
2.3.7	Células de silício monocristalino	36
2.3.8	Influência da radiação solar sobre o comportamento do módulo	38
2.3.9	Influência da temperatura sobre o comportamento do módulo	38
2.3.10	Ponto de potência máxima	39
2.3.11	Proteção dos módulos fotovoltaicos	40
2.3.12	Fatores que influenciam na eficiência da célula solar e do módulo fotovoltaico	41
2.4	Tipos de vento	42
2.4.1	Ventos planetários, gerais ou globais	43
2.4.2	Ventos geotróficos	44
2.4.3	Ventos de superfície e ventos locais	44
2.4.4	Brisas marinhas e ventos de montanhas	45

2.5	Variação do vento	46
2.5.1	Perfil vertical da velocidade do vento	47
2.5.2	Mudança na direção do vento	47
2.6	Rugosidade e cisalhamento do vento	48
2.6.1	Rugosidade	48
2.6.2	Obstáculos ao vento	48
2.6.3	Resguardo atrás de obstáculos	49
2.6.4	Altura dos obstáculos	50
2.6.5	Largura do obstáculo	50
2.6.6	Efeito túnel	50
2.6.7	Densidade do ar	51
2.6.8	Distribuição da pressão do ar nas pás do rotor	51
2.7	Medição da velocidade do vento (anemômetros)	52
2.7.1	Escolha do tipo de torre para a instalação dos rotores e dos equipamentos de medição	53
2.7.2	Intervalos de medição	53
2.8	Sistema de armazenamento de energia	53
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	55
3.1	Radiação solar no nível do solo	55
3.2	Procedimento de cálculo da radiação solar no plano do painel.	56
3.3	Painel fotovoltaico	58
3.4	Energia eólica	59
3.4.1	Classe e longitude de rugosidade	59
3.4.2	Cisalhamento do vento	60
3.5	Estatística aplicada a energia eólica	66
3.5.1	Variáveis discretas e contínuas	66
3.5.2	Distribuição de Weibull	69
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	71
4.1	Equipamentos utilizados	71
4.1.1	Aerogerador	72
4.1.2	Painel fotovoltaico	73
4.1.3	Controladores de carga	76

4.1.4	Banco de baterias	77
4.1.5	Inversor e controlador de carga	77
4.1.6	Anemômetro	78
4.1.7	Piranômetro	79
4.1.8	Equipamento de aquisição de dados	80
4.2	Processo de geração híbrida	84
4.3	Custo aproximado do sistema híbrido (valores em reais)	85
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
5.1	Rendimento do sistema híbrido	86
6	CONCLUSÃO	105
	REFERÊNCIAS	106
	APÊNDICE A -Painel Solar	109
	APÊNDICE B- Dados de tensão	110
	APÊNDICE C- Monitoramento da Tensão	111
	APÊNDICE D-Energia Gerada	120

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por energia força o desenvolvimento de novas alternativas para sua geração.

A energia gerada a partir de combustíveis fósseis compõe a matriz energética da maioria dos países e dá sustentação para o atual desenvolvimento tecnológico mundial.

O petróleo, grande fonte energética, base dos combustíveis líquidos, encontra-se armazenado em reservatórios a grandes profundidades. Para que esse petróleo chegue à superfície é necessário utilizar-se um sistema de bombeio, como, por exemplo, o bombeio mecânico, que utiliza uma bomba alternativa de fundo, a bomba de cavidade progressiva (BCP), além de outros sistemas de bombeio.

Todos esses sistemas necessitam de uma fonte externa de alimentação de energia que, para grande parte dos poços de petróleo, é fornecida pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica. Outra parte desses poços, no entanto, está localizada distante da rede, e as bombas são acionadas por motores que queimam combustíveis derivados do próprio petróleo. A queima desses combustíveis derivados do petróleo, normalmente, vem acompanhada da liberação de grandes quantidades de monóxido de carbono, dióxido de carbono e outras frações poluentes, substâncias que provocam o aumento da temperatura atmosférica e um grande desequilíbrio ambiental.

A energia elétrica, quando derivada de grandes reservatórios de água, ou seja, de grandes hidroelétricas, provoca impactos ambientais também indesejáveis. Se for de origem nuclear, há problemas relativos aos resíduos e, até o momento, não se tem conhecimento da existência de uma solução tecnológica viável.

O Sol, por sua vez, poderá oferecer uma grande quantidade de energia, de maneira inesgotável, com pequeno índice de poluição e mínimo impacto ambiental. Em regiões onde o regime de vento é favorável, a energia eólica poderá, também, ser uma alternativa que oferece baixa poluição e pequeno impacto ambiental na geração de energia elétrica.

1.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho de um sistema híbrido eólico-solar para gerar energia elétrica e estudar o seu comportamento em campo.

1.2 Objetivos específicos

- a) Estimar a capacidade de conversão da energia solar e da energia eólica disponível no Laboratório de Dispositivos Térmicos e Especiais (LABDTE), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- b) Determinar o desempenho do sistema híbrido montado.

1.3 Justificativa

Como, atualmente, há uma grande preocupação com o meio ambiente e, principalmente, com os gases que provocam o efeito estufa e o consequente aquecimento global, é necessário o desenvolvimento de outras fontes energéticas mais limpas.

Nesse contexto, a energia eólica e a solar se apresentam como alternativas, tecnicamente viáveis, com a finalidade de suprirem necessidades de setores não atendidos pela rede elétrica convencional.

Da mesma forma, o sistema híbrido eólico-fotovoltaico pode apresentar-se como alternativa, tecnicamente viável, para suprir as necessidades de setores não atendidos pela rede elétrica convencional, levando-se em consideração os seguintes itens:

- a) Na atualidade, há uma forte tendência de aumento da utilização per capita de energia, em determinadas regiões do mundo, principalmente, nos grandes centros urbanos ou em locais com um arranjo social privilegiado;
- b) Há muitos locais menos favorecidos, com relação à distribuição de recursos, principalmente, na área de energia elétrica;
- c) Crescente preocupação com o meio ambiente, no sentido de conseguir-se uma geração de energia limpa;
- d) Os meios tradicionais de geração de energia, como os provenientes da queima das reservas fósseis que constituem um recurso limitado e esgotável, apesar de serem, muito eficientes e terem custo de geração menores, apresentam um custo ambiental grande;

- e) O Brasil possui uma matriz energética que apresenta uma forte influência de grandes hidroelétricas que, apesar de serem fontes renováveis, também apresentam um custo ambiental elevado;
- f) Há locais totalmente desabastecidos dessas fontes energéticas em consequência das desigualdades socioeconômicas regionais.

O sistema híbrido eólico-fotovoltaico poderá atingir uma ótima adequação produção X demanda com a utilização integrada de geradores eólicos e fotovoltaicos, tendo como suporte de reservas um banco de baterias (chumbo-ácido), combinado com a possibilidade de utilização de equipamentos menos robustos, se comparados aos sistemas independentes, apenas eólico ou apenas solar. (GARCIA, 2004).

Os sistemas híbridos permitem, também, a utilização de uma maior fração de ambas as energias sem a necessidade de um sistema de armazenamento de maior porte. (GARCIA, 2004). Isto ocorre devido às distribuições temporais de ambas as fontes, em períodos diários e/ou sazonais, que podem até apresentar determinada defasagem em relação aos períodos de maior disponibilidade. Dessa forma, as fontes se complementam e conseguem satisfazer a demanda, inclusive com maior confiabilidade, pois, mesmo que os dias nublados e de calmaria continuem a se manifestar, a possibilidade de coincidência pode ser muito baixa. (GARCIA, 2004).

O sistema híbrido, além de apresentar um baixo custo de manutenção e operacionalidade, aliado à baixa poluição ambiental, poderá apresentar-se como uma opção de geração de energia para aquelas regiões afastadas dos sistemas de distribuição pelos meios convencionais de abastecimento energético. (GARCIA, 2004).

1.4 Escopo da dissertação

Essa dissertação constitui-se de seis capítulos em que são descritos e analisados os métodos e resultados relacionados com os principais componentes dos sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos autônomos de baixa potência, assim como a infra-estrutura montada para a realização dos experimentos.

Após a introdução, onde são apresentados os objetivos e justificativas desse estudo, o capítulo dois apresenta a revisão bibliográfica sobre energia solar e eólica e geração de

energia por meio de sistemas híbridos autônomos de pequeno porte. No capítulo três, há a fundamentação teórica referente à geração de energia solar fotovoltaica, geração eólica e híbrida. No quarto capítulo, é descrito o procedimento experimental, cada componente e seu funcionamento no sistema híbrido. No capítulo cinco, é realizada a análise dos resultados. No último capítulo, encerrando a dissertação, são apresentadas as conclusões da dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energias renováveis

O aquecimento global tem sido motivo de preocupação para a maioria dos pesquisadores da área, da mesma forma que a busca por fontes de energias inesgotáveis tem sido elemento motivador para várias pesquisas. (TOMALSQUIM, 2003).

O consumo de energia elétrica, nos últimos anos, tem crescido, consideravelmente, o que tem levado muitos países a traçarem uma estratégia de geração de energia a curto e longo prazo. É nesse contexto que as fontes de energias renováveis tem-se tornado o foco das atenções. (TOMALSQUIM, 2003).

Atualmente, a utilização dessas fontes de energias não se tem limitado apenas às comunidades isoladas que, até então, se constituíam um excelente nicho de aplicação. Para a melhor utilização de energias como a solar fotovoltaica, a eólica, pequenas centrais hidroelétricas e a energia da biomassa, que tinham suas aplicações voltadas para as comunidades isoladas, principalmente para aquelas afastadas da rede convencional de distribuição de energia, têm sido desenvolvidos projetos cujo objetivo é a complementação energética da rede convencional. (TOMALSQUIM, 2003).

A utilização da energia eólica se apresenta como uma boa opção para reduzir os níveis de dióxido de carbono lançados na atmosfera pelas fontes convencionais de geração de energia, a partir do carvão e de outras fontes de origem fósseis. O dióxido de carbono é o gás que possui maior responsabilidade para o acontecimento do efeito estufa, provocando mudanças climáticas globais que poderão levar a conseqüências desastrosas. (TOMALSQUIM, 2003).

2.2 Energia solar

A energia proveniente do Sol poderá ser convertida diretamente em eletricidade pelo chamado efeito fotovoltaico, que é o surgimento de uma diferença de potencial nas extremidades dos materiais semicondutores sob o efeito da intensidade luminosa, fenômeno relatado, pela primeira vez, por Edmond Becquerel, em 1839. (PALZ, 1995). A necessidade de

provimento de energia elétrica, em localidades remotas, a utilização dessa fonte de energia em naves espaciais e o desenvolvimento de satélites foram elementos impulsionadores para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica. (PALZ, 1995).

A crise energética e, principalmente, a do petróleo, ocorrida em 1973, ampliou o interesse no desenvolvimento e aplicações terrestres da tecnologia fotovoltaica.

O silício, segundo elemento mais abundante na superfície da terra, hoje, ocupa um lugar de destaque na produção de células fotovoltaicas, tanto na forma monocristalina, policristalina como amorfa. A busca por materiais alternativos sinaliza a utilização de filmes finos, utilizando silício amorfo. As células de filmes finos requerem uma menor quantidade de material do que as estruturas cristalinas e, também, envolvem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação, ocasionando maior eficiência energética e menor poluição ambiental. (PALZ, 1995).

2.2.1 Radiação solar

A radiação solar se apresenta como uma fonte inesgotável de energia, uma vez que o Sol, anualmente, despeja, sobre a superfície da Terra, $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh de energia, de maneira inesgotável, o que corresponde, aproximadamente, a 10.000 vezes a energia consumida, anualmente, pelo nosso planeta. (CEPEL/CRESESB, 1999).

2.2.2 Captação e conversão

A Terra desenvolve um movimento, em torno do Sol, descrevendo, anualmente, uma trajetória elíptica em um plano com inclinação de, aproximadamente, $23,5^\circ$ em relação ao plano equatorial, inclinação esta que dá origem às estações do ano e à variação diária da posição relativa da Terra em relação ao Sol. (CEPEL/CRESESB, 1999).

A declinação solar δ é a posição do Sol, ao meio dia solar, tendo como referência o plano do equador onde o Norte é convencionado como positivo. Essa variação angular pode ser vista na Figura 1 e varia de acordo com o dia do ano no intervalo angular a seguir:

$$-23,5^\circ \leq \delta \leq 23,5$$

A radiação solar que atinge a camada externa da atmosfera terrestre provém de uma camada superficial do Sol com, aproximadamente, 300 km de espessura, chamada fotosfera, e que está a uma temperatura superficial de, aproximadamente, 5800 K. Essa radiação não se apresenta com muita regularidade em função da influência das camadas externas do Sol, com pontos quentes e frios, erupções cromosféricas, etc. (CEPEL/CRESESB, 1999).

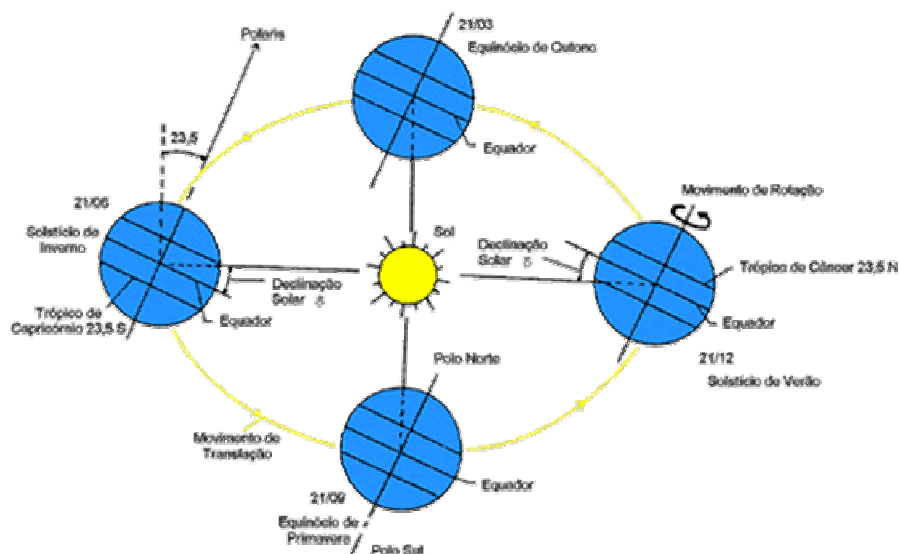


Figura 1 – Trajetória da terra em torno do Sol
Fonte: CRESESB

Apesar das variações na intensidade da radiação que incide sobre a terra, a *World Meteorological Organization* – (WMO) sugere um valor médio de 1367 W/m^2 para a radiação extraterrestre.

Segundo Lorenzo (1994), o espectro de radiação solar abrange comprimentos de onda, de $0,1\mu\text{m}$ até cerca de $8\mu\text{m}$, sendo que seu comprimento de onda, de maior intensidade emissiva, é de $0,55\mu\text{m}$, o que corresponde à cor verde.

A radiação solar é uma radiação eletromagnética com velocidade de propagação de 300.000 km/s .

A energia solar que incide em um meio material poderá ser **refletida**, **transmitida** ou **absorvida**. A fração **absorvida** que depende do meio material será a de interesse para o processo de fotoconversão. O espectro de radiação que incide fora da atmosfera terrestre e no nível do mar pode ser visto na Figura 2 (CEPEL/CRESESB, 1999):

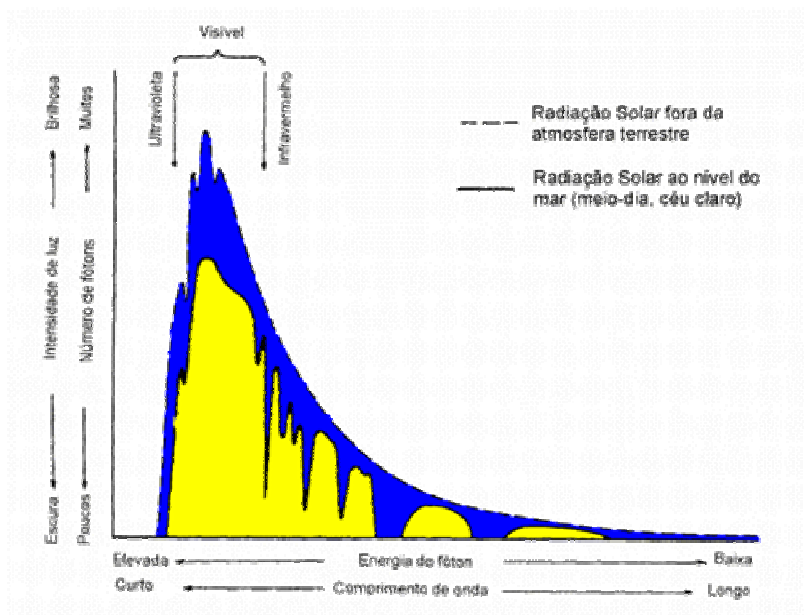


Figura 2 – Espectro de radiação solar
Fonte: CRESESB

2.2.3 Solarimetria e instrumentos de medição

É de fundamental importância ter medidas confiáveis, tanto da radiação direta quanto da radiação difusa, para melhor aproveitamento da energia solar disponível para um determinado local.

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) estabelece normas que determinam os limites de precisão para quatro categorias de instrumentos: 1º) instrumentos de **referência** ou **padrão**; 2º) instrumentos de **primeira classe**; 3º) instrumentos de **segunda classe**; e 4º) instrumentos de **terceira classe**. As medições padrões são: radiação global e difusa, no plano horizontal, e radiação direta normal.

A seguir, serão mostrados alguns dos principais instrumentos utilizados na medição das radiações.

- **Piranômetros:** Para Oliveira (1997 apud SIQUEIRA, 2005), os piranômetros são instrumentos utilizados para avaliar e medir a radiação solar global incidente em uma determinada superfície.

Denominados, eventualmente, como solarímetros, esses instrumentos medem a radiação solar global (direta + difusa). São instrumentos com os quais é realizada a maioria das medidas de radiação existentes. Existem, basicamente, dois tipos de piranômetros mais utilizados: 1º) piranômetros fotovoltaicos; 2º) piranômetros termelétricos. (SIQUEIRA, 2005)

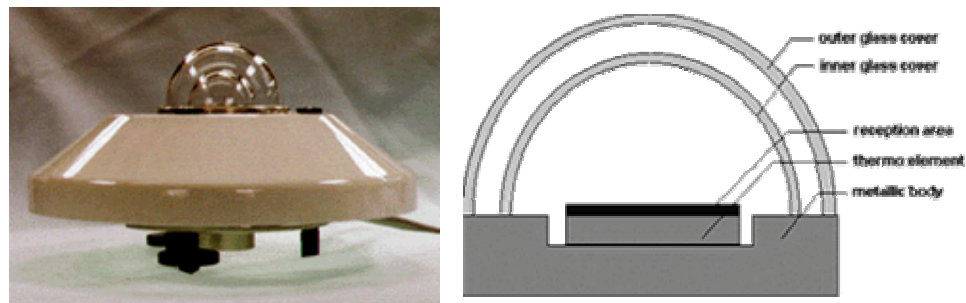


Figura 3 – Piranômetro
Fonte: CRESESB

A finalidade desse instrumento é medir a radiação solar global, através da recepção da energia solar de todo o hemisfério celeste, isto é, de horizonte a horizonte, em todas as direções. A faixa de comprimentos de ondas medidas pelo piranômetro é de 0,3 μm a 3 μm . A superfície receptora consiste de dois anéis de prata concêntricos – o anel interior é pintado de preto, e o de fora de branco. A diferença de temperatura entre os dois anéis é medida por termopares, e a expansão sofrida pelas superfícies provoca um diferencial de

potencial que mostra o valor instantâneo da energia solar. O conjunto é hermeticamente selado dentro de um hemisfério de vidro.

A radiação solar difusa também poderá ser medida pelos piranômetros, utilizando-se uma máscara adicional adaptada para filtrar os raios solares diretos.

- **Pireliômetros:** Pireliômetros são instrumentos utilizados para a medição da radiação solar direta. Esses dispositivos têm uma abertura colimada e uma superfície receptora que deve ser mantida normal aos raios solares. O instrumento segue o movimento do Sol, sendo, constantemente, ajustado para focalizar melhor a região do sensor.

- **Heliógrafo:** O heliógrafo é um instrumento utilizado para medir a duração do



brilho solar. Durante o tempo em que o disco solar fica visível através das nuvens, ou enquanto se pode observar sombras projetadas sobre o solo, os meteorólogos se referem à radiação direta, à qual é sensível o heliógrafo. O instrumento padrão registra a radiação acima de um limiar de iluminação de 210 W/m². Pode-se apresentar como modelo o heliógrafo Campbell-Stokes, composto de uma esfera de vidro de, aproximadamente, 10 cm de diâmetro, que permite concentrar os raios do sol sobre uma tira de papel azul-escuro em que a radiação queima um traço.

Figura 4 – Heliógrafo
Fonte: CRESESB/CEPEL

- **Actinógrafo:** Instrumento considerado de terceira classe, o actinógrafo apresenta uma precisão na faixa de 15 a 20% e é usado para medir a radiação global, sendo composto por sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico. Os sensores comandam uma pena que, ao serem expandidos, registram o valor instantâneo da radiação solar (CRESESB).

2.3 Energia solar fotovoltaica

O Sol constitui a grande fonte de energia que, diariamente, banha o planeta e é, normalmente, utilizada de forma indireta sob a forma combustíveis fósseis (petróleo, carvão), biomassa florestal, energia hídrica, energia eólica, energia das ondas e outras. (DWIA, 2006).

Garcia (2004) pontua que o efeito fotovoltaico pode ser considerado como resultado de um processo de conversão direta da luz solar em energia elétrica. Deve-se salientar que esse processo de conversão diminui com a elevação da temperatura da célula. Experiências realizadas no Pólo Sul geraram mais potência do que o esperado para um clima temperado. Tal resultado se justifica, pois os fótons da luz solar são transmitidos diretamente aos elétrons.

Ainda segundo Garcia (2004) os materiais mais adequados para provocar o efeito fotovoltaico são os semicondutores por apresentarem o maior produto corrente X voltagem para a luz visível, razão justificada pelo fato de que a maior quantidade de energia transportada pela radiação solar está contida na faixa visível do espectro.

2.3.1 Histórico do efeito fotovoltaico

Para Green et al. (2000), a excitação dos elétrons de alguns materiais semicondutores na presença de luz, relatado, pela primeira vez, por Edmond Becquerel, em 1939, chamado de efeito fotovoltaico, provoca o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos da estrutura do material. Entre os materiais semicondutores utilizados para a fotoconversão, o silício ocupa um lugar de destaque.

A primeira célula solar, com relativa eficiência, foi produzida, em 1954, por Pearson, Fuller e Chapin. Na década de 1960, o rendimento das células com iluminação AM1 ficou em torno de 12%. (PALZ, 1995).

Nos anos 1974-75, o desenvolvimento das fotocélulas tomou um novo rumo. Era necessário vencer dois obstáculos básicos que se colocavam contrários para o desenvolvimento de uma tecnologia barata: conseguir o alto grau de pureza do silício e a sua transformação em monocristais. Em 1976-78, foi estabelecido que a fotocélula de silício, com rendimento mínimo de 8%, poderia ser construída com silício de qualidade metalúrgica. Portanto, o silício ocupava uma posição confortável, como material de base para geradores solares do futuro. (PALZ, 1995).

As pesquisas, porém, utilizando outros materiais para a produção de fotocélulas não foram negligenciadas, como por exemplo, o GdAS para a utilização na fabricação de células para películas finas e desenvolvimento da célula de CdS que também teve uma boa evolução. A maior parte dos metais e semicondutores apresenta uma estrutura cristalina. Os elétrons que constituem um sólido podem dividir-se em dois tipos: os que estão diretamente ligados a núcleos individuais e formam íons, e os que são compartilhados pelo cristal e determinam as forças de coesão do cristal.

Como resultado das cargas iônicas, existem fortes campos elétricos dentro de um cristal. (PALZ, 1995).

2.3.2 Princípio de funcionamento

Na célula fotovoltaica, a conversão de energia luminosa é feita, diretamente, em energia elétrica, e o seu funcionamento é muito semelhante ao de um diodo foto-sensível que se baseia na utilização das propriedades dos materiais semicondutores.

Na composição da célula fotovoltaica, utilizam-se duas camadas de material semicondutor, dopadas de maneira diferente, conforme explicado a seguir:

- a) Em uma camada chamada N “negativa”, o material semicondutor será dopado com elementos que irão apresentar excesso de elétrons periféricos;
- b) Em uma camada chamada P “positiva”, o material semicondutor será dopado com elementos que irão apresentar déficit de elétrons;

O material formado por essas duas camadas possibilitará a existência de uma diferença de potencial entre elas. Os fótons contidos na luz solar, ao incidirem sobre os elétrons periféricos existentes na camada N, adicionarão energia a esses elétrons, fazendo-os saltarem a barreira de potencial, criando, assim, uma corrente contínua.

2.3.3 Barreira de potencial

Segundo Kreith (1965) e Callister (2002), um cristal consiste em um arranjo espacial de átomos, construído por repetição regular, dentro de uma unidade estrutural dimensional. Os elétrons de um sólido podem dividir-se em dois grupos: os que estão diretamente ligados a núcleos individuais e formam íons, e os que são compartilhados pelo cristal como um todo e determinam as forças de coesão do cristal.

Como resultado das cargas iônicas, existem fortes campos elétricos dentro de um cristal. O potencial desses campos varia com a posição, em forma periódica. Observa-se que, dentro do cristal, a curva potencial-energia, entre os íons adjacentes, tem o aspecto de uma pequena colina. A periodicidade se rompe somente próxima da superfície. Não existem íons à direita e há, ali, uma meia colina mais alta, uma “colina de energia potencial”, ou “barreira” na superfície.

Existem valores de níveis de energia para os quais os átomos não podem existir. São chamados ocos ou bandas proibidas. Os intervalos de energia nos quais podem existir os elétrons se chamam bandas. As bandas e os ocos se alternam; as bandas ficam mais amplas

em níveis mais altos, ao passo que os ocos se tornam mais escassos e chegam a desaparecer em níveis muito altos de energia.

Os elétrons livres de condução, quer dizer, elétrons que tem níveis de energia da ordem de B ou mais, tem suficiente energia para mover-se porque, em nenhum ponto da rede, está sua energia total inteiramente convertida em energia potencial. Esses elétrons não podem saltar a barreira, isto é, abandonar a superfície, a menos que sua energia seja da ordem do nível D ou mais. Para elétrons livres, o interior de um material pode considerar-se como um volume equipotencial com uma barreira de energia em sua superfície.

Se um só elétron, com um impulso de valor particular “p” é retirado de uma banda saturada, esta já não será inerte e leva uma corrente equivalente ao movimento de uma carga positiva de impulso p. Fala-se, assim, de uma corrente devida a um oco. Os ocos, em uma banda quase saturada, fazem o mesmo papel que os elétrons em uma banda quase vazia.

Outro modo de ver um oco (vazio) é em termos da estrutura de um cristal: a ausência de um elétron de valência, na estrutura de um cristal, é conhecida como um oco e serve como portador de eletricidade tão efetivamente como um elétron. Quando uma ligação está incompleta e existe um oco, é relativamente fácil, para um elétron de um átomo vizinho, deixar essa ligação e chegar ao oco. Um elétron que passa a ocupar um oco deixa outro em sua posição primitiva, de maneira que o oco se mova, efetivamente, em direção oposta à direção do elétron. O movimento de um oco em uma direção é equivalente ao transporte de uma carga negativa em sentido oposto. Quando se refere ao fluxo de corrente elétrica, o oco se comporta como uma carga positiva de magnitude igual à carga eletrônica. Para fins práticos, os ocos podem considerar-se como entidades físicas cujo movimento constitui um fluxo de corrente.

Em um semiconductor como o silício, a concentração de “ocos” ou elétrons livres pode ser aumentada, artificialmente, adicionando impurezas apropriadas. Se se adiciona uma impureza como o arsênio, que contém cinco elétrons de valência (um a mais que o silício) o átomo de impureza substitui um átomo de silício e fica com um elétron extra não ligado. A energia requerida, para retirar esse elétron da impureza e trazê-lo para a banda de condução, é extremamente pequena (da ordem de 0,01 eV). A energia térmica do cristal é suficiente para este propósito. Assim o elétron é “doador” e se move, livremente, na estrutura reticular e contribui na condutividade elétrica. A condutividade de um semiconductor impurificado com impurezas do grupo 5 é, principalmente, o resultado dos elétrons excedentes, isto é, cargas negativas, de impurezas do doador, e o material é chamado um semiconductor tipo – n.

Se, por outro lado, o átomo de impureza tem somente três elétrons de valência – boro, índio, ou gálio – o átomo de impureza não tem suficientes elétrons para completar todas as bandas de valência e se cria um oco. Esse tipo de impureza é conhecido como um receptor. Nesse caso, um elétron da banda de valência completará o “oco” e deixará um oco na banda de valência. Esse material tem uma condutividade incrementada devido ao movimento dos “ocos”, quer dizer, cargas positivas, e que se chama um condutor tipo – p.

Quando se produz um semiconductor, de modo que um extremo é do tipo “p” e o outro é do tipo “n”, um semiconductor do tipo “n” está adjacente a um do tipo “p” na interface. Assim, obtém-se uma chamada junta p-n em que os elétrons excedentes estão do lado “n” e os “ocos” extras do lado “p”. Alguns dos “ocos” e elétrons, na vizinhança da junta, entremesclam-se por difusão e se recombinam. Esse processo, por sua vez, cria um campo elétrico que oferece uma barreira de potencial à difusão de ocos de um lado e ao fluxo de elétrons do outro.

A necessidade desse campo fica evidente quando se observa que, em condições de circuito aberto, o fluxo resultante de ocos e de elétrons deve ser zero, depois de estabelecido o equilíbrio. As correntes de difusão devem ser contrabalanceadas por correntes de deslocamento induzidas por um campo criado em ambos os lados da junta. A barreira de potencial do campo em equilíbrio – V_0 , é uma função das concentrações do doador e do receptor.

Quando se aplica uma voltagem a uma junta, com o potencial positivo no lado p e o negativo no lado n, baixarão as alturas das barreiras de potencial existentes através da junta. Perturbar-se-á o equilíbrio que se estabeleceu, inicialmente, entre as forças que tendem a produzir a difusão de portadores de maioria (elétrons em um material tipo n e ocos em material tipo p), assim como a influência freadora da barreira de potencial. O potencial positivo permitirá aos elétrons cruzar o lado p e contribuir para a corrente. De modo semelhante, o potencial negativo atrairá os ocos do lado p ao lado n que, também, contribuem na corrente.

A radiação solar consiste em fótons, a maior parte dos quais têm suficiente energia quando incidem sobre uma junta p-n para romper uma ligação de valência e criar um par elétron-oco. Se os elétrons são absorvidos na junta ou cerca da mesma, os pares elétron-oco se difundirão, na região da junta, onde o campo criado fará com que se separem, de maneira que fluirão ocos ao material tipo p e elétrons ao material tipo n. Esse processo cria uma voltagem externa sobre o dispositivo e produz um fluxo de corrente, quando se conecta uma carga entre

as duas capas. A radiação solar atua, em conseqüência, como um gerador de corrente que tem uma força proporcional à radiação solar.

Para conduzir essa corrente gerada, utilizam-se dois eletrodos: um conectado à camada **n**, e o outro à camada **p**. O eletrodo da camada superior se apresenta no formato de uma grelha, de maneira que permite a passagem dos raios luminosos. Nessa superfície superior, é depositada uma camada anti-reflexo de forma a aumentar a quantidade de luz absorvida.

2.3.4 Células fotovoltaicas

O aproveitamento da energia solar para a produção direta de energia, na forma elétrica, no atual estágio de desenvolvimento tecnológico pode ser conseguido através das células fotovoltaicas que constituem os módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado.

O silício, atualmente, é o material semicondutor mais importante utilizado para a conversão fotovoltaica de energia solar. As células fotovoltaicas poderão ser constituídas com silício de estrutura monocristalina, policristalina e amorfa. Também poderá ser utilizada a tecnologia de filmes finos, assim como outros materiais além do silício como germânio, gálio e outros.

As células de “baixo custo” poderão ser redondas ou quadradas, sendo obtidas pelo fatiamento de hastes por meio do processo de fusão.

A estrutura de uma célula típica de silício monocristalino é mostrada, esquematicamente, na

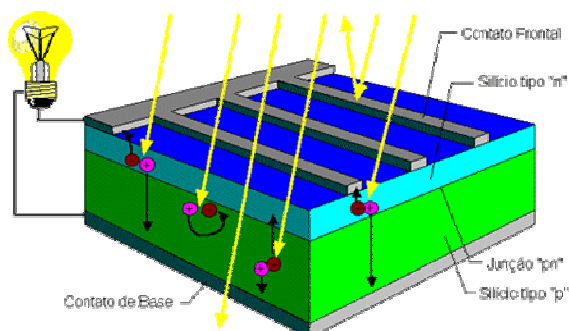


Figura 5:

Figura 5 – Fotocélula
Fonte: CRESESB

Os principais tipos de células disponíveis no mercado, fabricadas a partir do silício, atualmente, são:

- a) **células monocristalinas:** fabricadas de silício monocristalino, possuem maior eficiência, com aproveitamento entre 14 e 16 % da energia solar, apresentando, no entanto, um custo bastante elevado;
- b) **células policristalinas:** fabricadas a partir de silício policristalino, apresentam eficiência entre 12 e 14%, possuem preços mais acessíveis do que as células monocristalinas;
- c) **células de silício amorfo:** apresentam-se como uma tecnologia promissora, consistindo na deposição de camadas muito finas de silício sobre diversos tipos de material (por exemplo, plásticos). Apresentam um variado leque de aplicações, principalmente, em elementos construtivos de edifícios; possuem custos mais reduzidos, apesar da eficiência ser menor do que nas células cristalinas, eficiência esta se situando entre 7 e 11%. (PALZ, 1995).

2.3.5 Influência da temperatura

O rendimento de uma célula fotovoltaica depende da luminosidade e da temperatura.

A temperatura é um parâmetro de relativa importância, uma vez que as células, estando sob o efeito dos raios solares, apresentam um aquecimento inevitável. Além do mais, uma grande parte da energia solar absorvida não é transformada em energia elétrica, mas dissipada sob a forma de calor, razão pela qual a temperatura de funcionamento de uma célula sempre é superior à temperatura ambiente.

Como mencionado acima, a saída de potência útil de uma célula solar cai quando a temperatura aumenta. Isto pode ser visto na Figura 6.

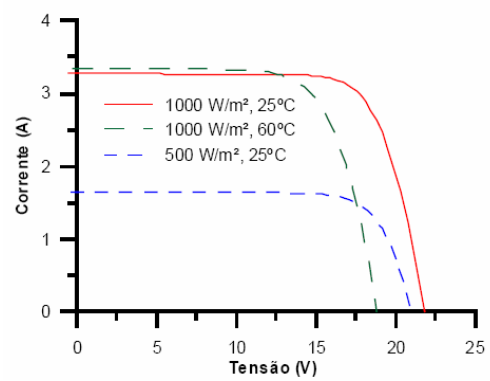


Figura 6 – Gráfico tensão x corrente
Fonte: GARCIA, 2004

Nas células típicas, a perda chega de 0,35% a 0,45%°C de aumento de temperatura.

Para a luz solar fora da atmosfera terrestre, com uma intensidade luminosa de 1,38 kW/m², o rendimento teórico máximo de conversão para células de silício é, aproximadamente, 19%. No nível do mar, o espectro é diferente. Descobriu-se, experimentalmente, que a eficiência das células de silício pode ter um rendimento 20% maior no solo do que fora da atmosfera. (GARCIA, 2004).

2.3.6 Aplicações

Os painéis fotovoltaicos são indicados, sobretudo, para utilização em baixas potências, em locais distantes da rede elétrica. A energia produzida no período de sol, durante o dia, poderá ser armazenada em baterias para ser utilizada na iluminação noturna, em frigoríficos, comunicações, sinalizações luminosas em locais remotos, telefones de emergências, iluminação de parques e miradouros, casas isoladas, estações meteorológicas, sistemas de vigilâncias contra incêndio e outros fins, além de poderem trabalhar conectadas ao sistema convencional de distribuição de energia elétrica.

- **Contatos elétricos:** Elementos importantes para a célula fotovoltaica são os contatos elétricos, pois eles funcionam como ponte que conecta o semicondutor com a carga externa. O contato da parte de trás da célula – lado oposto à incidência solar – é relativamente simples e, normalmente, consiste em uma capa de alumínio ou de metal molibdênio.

O contato dianteiro, que está exposto ao sol, é mais complexo. A luz solar, quando incide sobre a superfície da célula, gera corrente elétrica por toda a sua superfície. Usar contatos apenas nas extremidades da célula não seria adequado em função da resistência existente na camada de superfície. Desse modo, a solução encontrada foi a utilização de uma malha de metal fina para evitar o escurecimento das partes ativas da célula e, conseqüentemente, não reduzir a eficiência de conversão, tendo, no entanto, boa condução e possibilidade de se espalhar por toda a superfície da célula. Portanto, essa malha deve ter grossura suficiente para que haja um bom fluxo de corrente e, também, ser fina o suficiente para não bloquear a luz incidente sobre a célula.

- **Sistema fotovoltaico autônomo:** Os componentes fundamentais que caracterizam um sistema fotovoltaico são sua própria carga e o módulo fotovoltaico. Um sistema simples somente permitiria consumos proporcionais à radiação solar, ou seja, durante as horas do dia e, principalmente, em dias claros.

Para ampliar a utilização do sistema, é necessário dotar o conjunto de um dispositivo de armazenamento que disponibilize energia nos momentos de baixa ou nenhuma incidência solar, um dispositivo de acumulação que, normalmente, é feito através de baterias de chumbo-ácido. Para conseguir um bom desempenho do conjunto e prolongamento da vida da bateria, é necessário intercalar, entre esses elementos, um sistema eletrônico de regulação que evite sobrecargas e descargas profundas no acumulador.

A manutenção das instalações fotovoltaicas apresenta-se de maneira relativamente simples, além de ter baixo custo. O módulo fotovoltaico tem um tempo de vida útil superior a 20 anos, e as baterias, caso tenham dimensionamento adequado, podem apresentar uma durabilidade de quatro a cinco anos.

2.3.7 Células de silício monocristalino

O silício é um semicondutor que apresenta quatro elétrons em sua camada de valência, e seus átomos se organizam através de ligações covalentes. Através da incidência de energia térmica, alguns desses elétrons podem se tornar elétrons livres, deixando lacunas nas quais, antes, havia a ligação.

Se ambos os lados da célula forem conectados por um condutor, quando esta estiver iluminada, circulará uma corrente de intensidade proporcional à irradiância incidente sobre a célula que é denominada de corrente de curto-circuito.

Tendo presente que a célula é fabricada da mesma maneira que um diodo retificador (junção PN), seu circuito equivalente simplificado está apresentado pela Figura 7.

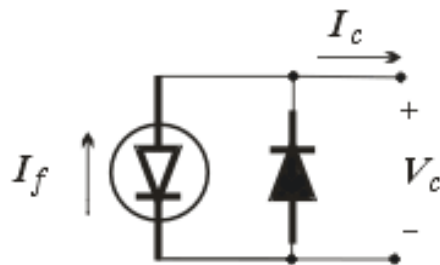


Figura 7 – Circuito equivalente simplificado da célula solar
Fonte: GARCIA, 2004

A equação, a seguir, descreve este modelo de célula, conforme Garcia (2004).

$$I_c = I_f = I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{V_c}{m V_t}\right) - 1 \right) \quad (2.1)$$

$$V_t = \frac{K \cdot T_c}{e} \quad (2.2)$$

onde I_c e V_c são corrente e tensão da célula, I_o é a corrente reversa de saturação, V_t é a tensão térmica da célula, e é a carga do elétron, K a constante de Boltzmann, T_c a temperatura absoluta da célula e m um fator de idealidade, com valor típico entre 1 e 2. (CIEMAT, 2000).

Um módulo que se aproxima da realidade deverá considerar a resistência série (R_s) e a resistência paralela (R_p) que aparecem em função das características dos materiais, defeitos e técnicas de fabricação, como pode ser visto na Figura 8 a seguir:

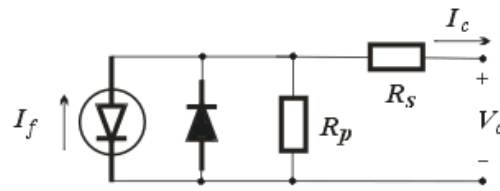


Figura 8 – Circuito equivalente da célula solar
Fonte: GARCIA, 2004

A partir do circuito apresentado na Figura 8, pode-se deduzir a equação que descreve o comportamento da célula (GARCIA, 2004):

$$I_c = I_f - I_o \cdot \left(\exp \left(\frac{V_c}{V_t} \right) + I_c \cdot \frac{R_s}{m} \cdot (V_t - 1) \right) - V_c + I_c \frac{R_s}{R_p} \quad (2.3)$$

2.3.8 Influência da radiação solar sobre o comportamento do módulo

Como a ação dos fótons é que proporciona a liberação de portadores na junção PN, a corrente produzida dependerá da intensidade da radiação solar incidente, conforme a equação a seguir:

$$I_{sc2} = I_{sc1} \cdot \frac{G2}{G1} \quad (2.4)$$

onde G1 e G2 são valores de irradiâncias e I_{sc1} é a corrente de curto-circuito para a irradiância G1.

Experimentalmente, é comprovado que a corrente de curto-circuito segue uma variação linear com a radiação solar medida através de piranômetros, de maneira que, se a radiação solar dobrar, a corrente de curto-circuito do módulo também será o dobro. (GARCIA, 2004).

2.3.9 Influência da temperatura sobre o comportamento do módulo

O comportamento da corrente é influenciado, diretamente, pela sua temperatura, e a tensão, numa relação inversa. Assim sendo, aumentos da temperatura da célula contribuem para o aumento da corrente fotogerada e diminuição de sua tensão.

Com valores característicos de $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, respectivamente. (ARAÚJO et al., 1985 apud GARCIA, 2004).

2.3.10 Ponto de potência máxima

Nas células e nos módulos fotovoltaicos, a máxima corrente acontece no ponto de curto-circuito, onde a potência fornecida é zero, porque a tensão, nos terminais, é zero V. O mesmo acontece no ponto em que a tensão é máxima – o de circuito aberto – onde a corrente é zero A. Analisando, a curva característica, no eixo da tensão crescente, a corrente permanece praticamente constante, até o ponto em que a diminuição da corrente tem maior influência do que o aumento da tensão, e aí a potência diminui rapidamente. Esse comportamento poderá ser observado na Figura 9, para um módulo fotovoltaico, revelando um nítido ponto de potência máxima (P_m). Os pontos em que a tensão e corrente correspondem à potência máxima são chamados de I_m e V_m (Figura 9, Tabela 1).

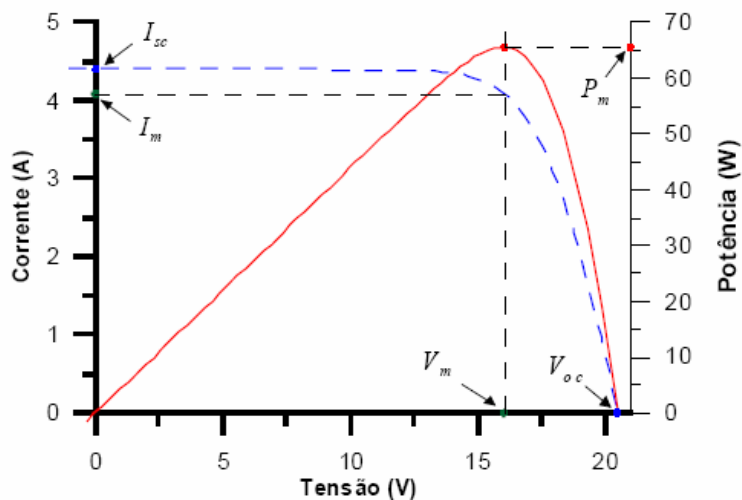


Figura 9–Comportamento da potência de um módulo fotovoltaico.
Fonte: GARCIA, 2004.

Tabela 1 - Condições padrão para a definição do comportamento de um módulo fotovoltaico.

Grandeza	Valor
Irradiância	1000 W/m ²
Temperatura da célula	25°C
Distribuição espectral	AM 1,5

Fonte: GARCIA, 2004

2.3.11 Proteção dos módulos fotovoltaicos

Em associações, alguns módulos fotovoltaicos podem se converter em cargas de outros sob determinadas condições de operação. Isto poderá ocasionar um mau funcionamento do painel, caindo o rendimento do conjunto, e aumentar a sua velocidade de deterioração, provocando a substituição parcial ou total do equipamento antes do tempo previsto.

Quando o módulo não estiver suficientemente iluminado, em dias nublados ou à noite, por exemplo, se ele estiver conectado a um banco de baterias, seu comportamento passará a ser o de uma associação série de diodos diretamente polarizados. Para evitar a descarga das baterias, por algum tempo, foram utilizados diodos de bloqueio, entre o painel e o banco de baterias.

Alguns estudos chegaram à conclusão que a potência dissipada nos diodos, durante os períodos de boa luminosidade, poderia ser igual ou até superior à poupada do banco de baterias nos períodos sem iluminação. Esses estudos levaram à racionalização da utilização e distribuição desses diodos. Todavia, quando vários módulos, ligados em série, são associados em paralelo, em um painel, devem ser usados diodos de bloqueio para evitar que alguns módulos se convertam em cargas de outros.

Se módulos ou células ligados em série se converterem em carga de outros, sua tensão fica polarizada em sentido reverso, ou seja, com potenciais positivos do lado N, e negativo do lado P.

A solução adotada para proteção das células para essa situação seria a instalação de um diodo retificador chamado de “diodo de *bypass*”, pelo qual se desviaria a corrente que poderia circular de maneira reversa pela célula. Na prática, não se utiliza um diodo para cada célula, mas para um grupo delas, conforme a Figura 10, a seguir. (GARCIA, 2004):

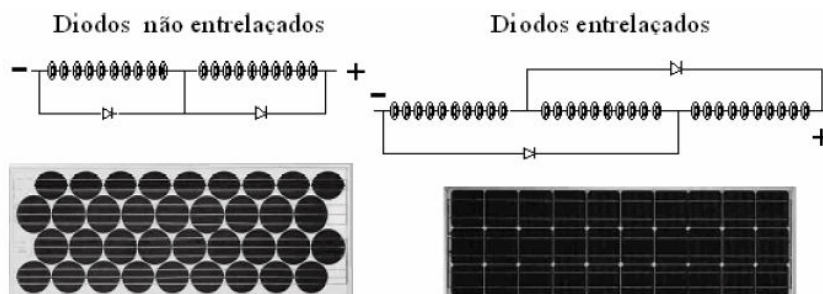


Figura 10 – Conexão de diodos de *bypass* nos módulos fotovoltaicos
Fonte: GARCIA, 2004

2.3.12 Fatores que influenciam na eficiência da célula solar e do módulo fotovoltaico

Em uma célula iluminada pela radiação solar, uma parte dos fótons que incide sobre a célula é refletida, e outra penetra no cristal (CABRERIZO, 1987; ARAÚJO et al., 1985, apud GARCIA, 2004). Em uma célula sem proteção anti-reflexiva, a reflexão é da ordem de 30%, o que leva à utilização de células texturizadas e recobertas por películas anti-reflexivas que reduzem esse valor para, aproximadamente, 10%.

Dos fótons que penetram na célula, apenas uma parcela contribui para a geração de corrente, pois alguns possuem pouca energia, sendo incapazes de arrancar um elétron de sua ligação, e outros possuem energia em excesso, estando aptos para atravessarem o cristal.

Cada fóton absorvido pode liberar apenas um elétron, mesmo que ele possua mais energia do que o necessário para a retirada do elétron de sua posição. Uma vez produzido o par elétron-lacuna, eles podem se recombinarem no cristal sem contribuírem para o efeito fotovoltaico. Segundo Cabrerizo (1987 apud GARCIA, 2004), as perdas associadas aos efeitos mencionados acima ficam em torno de 65%.

A radiação sobre a célula também diminui em função da área ocupada pela grade metálica que transporta a corrente. Parte da energia gerada pelo efeito fotovoltaico é, também, dissipada pela resistência interna da grade metálica e pelos contatos elétricos que os transformará em calor pelo efeito Joule.

Apesar de, atualmente, a eficiência dos módulos fotovoltaicos ficar em torno de 15%, em laboratórios, têm-se conseguido eficiências superiores, sinalizando que, para um futuro próximo, será possível obter eficiência com células fotovoltaicas que se aproximarão a 28,8%, considerada máxima por Green (1995), segundo Hecktheur (2001 apud GARCIA, 2004).

A eficiência das células fotovoltaicas e dos módulos é obtida pela relação entre a potência que as mesmas podem fornecer e a radiação solar incidente, como pode ser visto pela equação a seguir.

$$\eta = I_{\text{mod}} \cdot \frac{V_{\text{mod}}}{A_{\text{mod}}} \cdot G \quad (2.5)$$

em que η mod é a eficiência para uma dada radiação (G), e A_{mod} é a área do módulo.

- **Rendimento das células solares:** O material utilizado, normalmente, nas células solares é o silício, um elemento tetravalente, o que significa dizer que

cada átomo de silício pode se ligar a outros quatro átomos de silício. Poderá, também, ser utilizado arsenieto de gálio, camadas finas CdTe (telureto de cádmio), o CIS (cobre, índio, selênio) e, ainda, o CIGS (cobre, índio, gálio, selênio).

A Tabela 2, a seguir, apresenta os rendimentos **típicos e teóricos** obtidos por cada uma das tecnologias.

Tabela 2 – Rendimento das diferentes tecnologias

Tecnologia	Rendimento típico (%)	Rendimento teórico (%)
Monocristalinas	12 – 16	24,0
Policristalinas	11 – 13	18,6
Amorfas	5 – 10	12,7

Fonte: CRESESB/CEPEL

2.4 Tipos de Vento

O vento existe como resultado de um aquecimento desuniforme da superfície da terra, gerando regiões com densidades e pressões diferenciadas das massas de ar. A tendência à equalização das pressões é o que provoca o deslocamento dessas massas de ar de um local para outro, gerando o vento.

O comportamento do vento também sofre a influência da sazonalidade, resultante do aquecimento diferenciado das várias regiões da terra, em função de sua trajetória e modificação de sua exposição ao sol durante o ano. Portanto, a direção e a intensidade do vento terão uma instabilidade considerável ao longo do tempo. (CRESESB/CEPEL, 1999).

Devido à rotação do globo terrestre, qualquer movimento no hemisfério Norte, em direção ao hemisfério Sul, será desviado para a direita, se o observador estiver fixo no solo e, no hemisfério Sul, será desviado para a esquerda. Essa força aparente que provoca uma curvatura no deslocamento é conhecida como **Força de Coriolis**.

A força de Coriolis é um fenômeno visível que poderá ser observado, nas vias da ferrovia Ferrocarril, onde os trilhos do trem se desgastam mais rapidamente de um lado do que do outro. O mesmo fenômeno pode ser observado nas margens dos rios onde são

escavadas mais profundamente de um lado do que do outro, dependendo de qual hemisfério seja considerado.

Com o vento, acontece o mesmo fenômeno. No hemisfério Norte, o vento tende a soprar no sentido contrário ao giro dos ponteiros do relógio (visto de cima) e, no hemisfério Sul, o vento tende a soprar no sentido de giro dos ponteiros do relógio. Os tipos de ventos são:

2.4.1 Ventos planetários, gerais ou globais

A massa de ar quente sobe no entorno do equador e se distribui para o Norte e para o Sul nas camadas mais altas da atmosfera.

Ao redor dos 30° de latitude, em ambos os hemisférios, a força de Coriolis evita que a massa de ar vá mais além. Nessa latitude, encontra-se uma área de altas pressões, fazendo com que o ar comece a descer novamente. Quando o vento sobe nas proximidades do equador, provocará uma área de baixa pressão no nível do solo, atraindo os ventos do Norte e do Sul. Nos pólos, haverá altas pressões devido ao ar frio. Levando-se em consideração a força de curvatura, devido à força de Coriolis, serão obtidos os seguintes resultados gerais das direções dos ventos dominantes (Tabela 3):

Tabela 3 – Ventos dominantes devido à movimentação global

Latitude	90 – 60°N	60 – 30°N	30 – 0°N	0 – 30°S	30 – 60°S	60 – 90°S
Direção	NE	SO	NE	SE	NO	SE

Fonte: Disponível em: <<http://www.windpower.dk>>

As direções dominantes do vento são importantes para se colocar um aerogerador, já que é importante localizá-lo em um local em que haja o mínimo número possível de obstáculos para as direções dominantes do vento. Salienta-se que a geografia local poderá influenciar os resultados da tabela anterior (Tabela 3).

A circulação das massas de ar, gerando os ventos planetários, é o resultado de um aquecimento desigual da superfície da terra, aquecimento este diferenciado em função da natureza material que constitui a superfície da terra, transmitindo calor de maneira desigual para a camada de ar próxima, gerando variações de pressão. A maior absorção de calor da radiação solar encontra-se situada em uma faixa, nas proximidades do equador, gerando uma zona de baixa pressão. As regiões próximas aos pólos, devido a uma temperatura mais baixa

e, conseqüentemente, maiores pressões, provocam o deslocamento dessas massas em direção ao equador.

A direção do vento, provocada pela diferença de pressão entre o equador e os pólos, é alterada pela influência da rotação da terra em torno do seu próprio eixo. Observa-se que um ponto na superfície da terra, situado na linha do Equador, possui uma velocidade de 1609 km/h, reduzindo-se a zero nos Pólos. Portanto, as massas de ar se deslocam dos pólos em direção ao Equador com um desvio a Oeste devido à inércia, enquanto o ar mais quente se movimenta na parte superior da atmosfera (numa altura de aproximadamente de 1800 m) na direção dos pólos, tendendo a desviar-se para o Leste.

Devido à inclinação do eixo da terra de um ângulo de $23,5^\circ$ em relação ao plano de deslocamento ao redor do sol durante o ano, ocorrerão variações periódicas no calor absorvido da radiação solar pela superfície da terra, resultando em modificações periódicas, tanto na força e velocidade quanto na direção dos ventos em determinadas localizações da terra durante o ano. (www.windpower, 2006).

2.4.2 Ventos geostróficos

Os ventos considerados, anteriormente, como ventos globais são, na realidade, ventos geostróficos. Esses ventos são gerados, fundamentalmente, pelas diferenças de temperatura e de pressão, sendo influenciados apenas pela superfície da terra. Manifestam-se a uma altura de 1000 metros, a partir do nível do solo, e podem ser medidos por meio de sondas.

2.4.3 Ventos de superfície e ventos locais

Se considerar-se uma altitude de até 100 m, os ventos são muito mais influenciados pela superfície terrestre. O vento é freado pela rugosidade da superfície da terra e pelos obstáculos. As direções do vento, próximas da superfície, serão ligeiramente diferentes das dos ventos geostróficos devido à rotação da terra (força de Coriolis) e às influências locais.

Ainda que os ventos globais sejam importantes na determinação dos ventos dominantes de uma determinada área, as condições climáticas locais podem influenciar nas direções de ventos mais comuns. Os ventos locais sempre se superpõem aos sistemas eólicos

de grande escala, isto é, a direção do vento é influenciada pela soma dos efeitos globais e locais. Quando os ventos de grande escala são suaves, os ventos locais podem dominar os regimes de vento.

Portanto, paralelamente à circulação dos ventos planetários, surgem os ventos locais, produzidos devido ao aquecimento desigual entre a superfície da terra e das águas (oceanos, mares e lagos), ou mesmo pelas diferentes constituições físicas e geológicas da própria superfície da terra. Esses ventos locais têm uma grande variabilidade em velocidade e direção, despertando muito interesse para o mapeamento do potencial eólico de um determinado local.

2.4.4 Brisas marinhas e ventos de montanhas

Durante o dia, a superfície da terra se aquece mais rapidamente do que a superfície das águas, transferindo mais calor para a camada de ar próxima, criando uma região de pressões menor do que sobre as superfícies das águas e, conseqüentemente, provocando vento no sentido água-terra. Durante a noite, o sentido de movimentação das massas de ar se inverte.

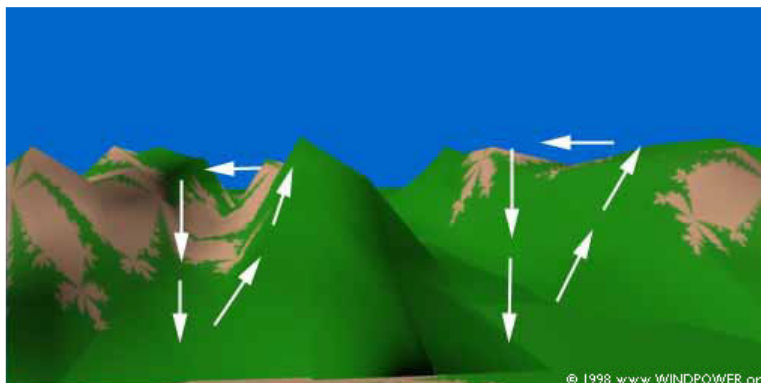


Figura 11: Ventos de montanhas e vales
Fonte: Disponível em: <<http://www.windpower.dk>>

Entre montanhas e vales ocorre um fenômeno semelhante. Durante o dia, o ar, próximo à superfície das montanhas, se aquece e sobe, sendo substituído pelo ar mais frio e mais denso que estava em um nível superior, provocando um movimento descendente das massas de ar. Já, durante a noite, o sentido de movimento é invertido, como resultado de um resfriamento da superfície das montanhas e conseqüente resfriamento das massas de ar próximas, conforme pode ser visto na Figura 11, acima.

2.5 Variação do vento

A média de velocidade do vento, em um determinado período de tempo, poderá ser utilizado para calcular a energia (kWh/m²), por unidade de área, que possibilitará um indicativo da energia eólica gerada. É, portanto, um importante fator a ser considerado para a seleção de um determinado local para a instalação de uma turbina eólica com a finalidade de geração de energia eólica.

A média da velocidade do vento, em um período considerado, não indica a variação da velocidade durante o período, havendo, assim, a possibilidade de serem encontrados dois locais com igual média de velocidade do vento, apresentando diferentes potenciais de geração de energia. Recomenda-se, então, a utilização de uma média horária de velocidade para um período de, no mínimo, dois anos, o que irá considerar, então, as variações sazonais contidas no período. O mais recomendado é que se utilize um período de cinco anos, para que seja possível considerar a variabilidade da velocidade do vento.

Pode-se utilizar a curva característica da turbina eólica ou curva de potência na qual será apresentada a velocidade inicial, a velocidade de regime e a velocidade final. A velocidade inicial representa a velocidade do vento necessária para a turbina começar a gerar potência; a velocidade de regime é aquela em que se produzirá potência. No intervalo entre a velocidade inicial e a velocidade de regime, haverá um considerável aumento de energia produzida pela turbina. A geração de potência, quando ocorre um aumento da velocidade do vento, além da velocidade de regime, é conseguida com a utilização de um mecanismo que controla a velocidade de pico ou por um regulador de *stall*, que tira a turbina de operação. A velocidade final é aquela para a qual a turbina deixa de produzir energia, como pode ser visto na Figura 12. (FARIAS, 2000).

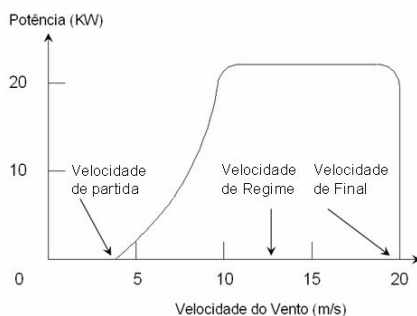


Figura 12: Curva característica de uma turbina eólica
Fonte: FARIAS, 2000.

O vento sofre variações em função do local e, também, do momento considerado – hora, dia, mês do ano. A variação espacial apresenta uma dependência das condições geográficas, natureza do solo, relevo, superfície com espelho d'água; a variação no tempo recebe influência do posicionamento do local com relação à irradiação solar recebida que varia ao longo do ano.

2.5.1 Perfil vertical da velocidade do vento

A velocidade do vento irá decrescendo, à medida que se aproxima da superfície da terra, em função do atrito. Essa velocidade, portanto, irá crescer com o aumento da altitude. Para se evitar o efeito inconveniente da turbulência, recomenda-se a utilização de uma altura mínima de 10 metros para a instalação das turbinas, mesmo para as de pequeno porte.

A variação da velocidade, em função da altura, é denominada de **perfil vertical de velocidade** ou **cisalhamento vertical**.

As pás de um rotor irão sofrer a influência da atuação de uma carga cíclica, ou seja, a extremidade das pás irá suportar um maior esforço ao atingirem a parte mais alta, e um menor esforço quando estiverem passando na parte inferior. Esse efeito do excessivo esforço, face à variação do cisalhamento vertical, será muito prejudicial, porque irá aumentar a fadiga do rotor e, também, provocará flutuações na geração de potência.

2.5.2 Mudanças na direção do vento

Existem duas razões principais que modificam a direção do vento: uma delas é a sazonal, resultado da circulação global dos ventos; a outra é devido às variações diurna/noturna e curto-prazo. A variação devido à circulação global não apresenta efeito negativo na eficiência operacional da turbina eólica. Utiliza-se a rosa-dos-ventos para ilustrar as variações na direção do vento.

2.6 Rugosidade e cisalhamento do vento

A uma altura de, aproximadamente, 1000 m a partir da superfície do solo, a rugosidade do terreno influenciará muito pouco ou quase nada sobre o comportamento do vento. Sem nenhuma dúvida, nas camadas mais baixas da atmosfera, as velocidades dos ventos serão afetadas pelo atrito com a superfície do solo.

2.6.1 Rugosidade

De uma maneira geral, quanto mais pronunciada for a rugosidade do terreno, maior será a influência no deslocamento da massa de ar, ou seja, o vento tenderá a se apresentar com menor velocidade e maior turbulência.

Obviamente, os bosques e as grandes cidades causam muita interferência na velocidade do vento. Entretanto, as pistas de asfalto, concreto ou cimento dos aeroportos interferem muito pouco na velocidade do vento. As superfícies da água podem ser consideradas mais lisas do que as pistas de concreto e, portanto, com menor influência sobre o vento. A presença de vegetação, de arbustos, influencia a velocidade do vento de maneira considerável.

2.6.2 Obstáculos ao vento

Os obstáculos para o vento, tais como edifícios, árvores, formações rochosas e outros, podem diminuir a velocidade do vento de forma significativa e criar turbulências em torno deles.

Nas Figuras 13 e 14, pode ser observado o desenho de típicas correntes de vento em torno de um obstáculo. A zona de turbulências pode estender-se até, aproximadamente, três vezes a altura do obstáculo. A turbulência é mais pronunciada atrás do obstáculo do que na sua frente.

Portanto, o melhor é evitar grandes obstáculos próximos das turbinas eólicas e, em particular, quando se encontrarem na direção em que sopra o vento dominante, quer dizer, “em frente à turbina”.

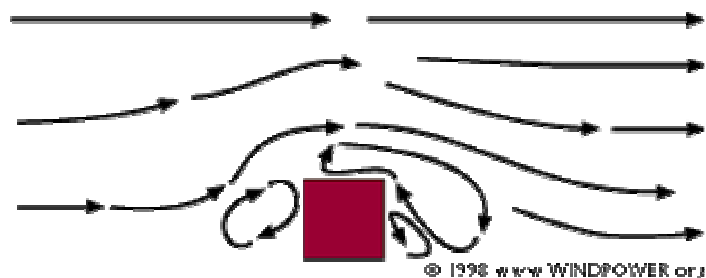


Figura 13 – Efeito da turbulência. Vista lateral
 Fonte: Disponível em: <<http://www.windpower.dk>>

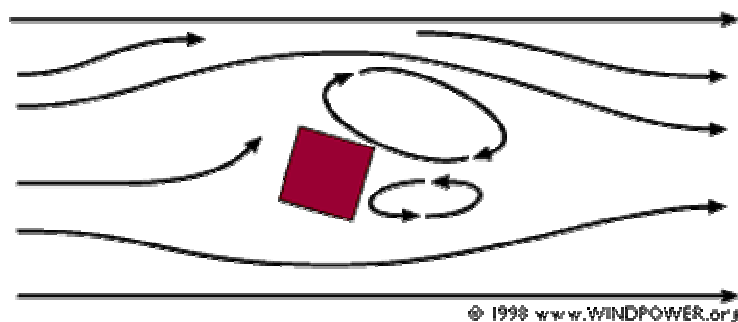


Figura 14 – Efeito da turbulência. Vista superior
 Fonte: Disponível em: <<http://www.windpower.dk>>

2.6.3 Resguardo atrás de obstáculos

Os obstáculos diminuirão a velocidade do vento. Essa diminuição dependerá da porosidade do obstáculo, ou seja, o quanto ele é “aberto”. A porosidade é definida como a área livre dividida pela área total do objeto de frente para o vento.

Naturalmente, um edifício é sólido e não tem porosidade, ao passo que uma árvore sem folhas, no inverno, poderá deixar passar mais da metade do vento.

O efeito de frenagem, produzido por um obstáculo, aumenta com sua altura e largura. Obviamente, o efeito será mais intenso nas proximidades do obstáculo e do solo.

2.6.4 Altura dos obstáculos

Quanto mais altos forem os obstáculos, maiores serão os abrigos. Se uma turbina estiver a uma distância menor do que cinco vezes a altura do obstáculo, ou o obstáculo possuir uma altura maior do que a metade da altura de instalação da turbina, a influência na velocidade do vento dependerá da geometria exata do obstáculo.

2.6.5 Largura do obstáculo

Quanto mais largo for o obstáculo, maior será o efeito de resguardo por ele provocado.

2.6.6 Efeito túnel

Se tomar-se como ponto de observação o caminho entre dois edifícios, ou uma passagem estreita entre montanhas, poder-se-á observar que o ar se comprime entre os edifícios ou entre as montanhas expostas ao vento, e sua velocidade crescerá, consideravelmente, entre os obstáculos do vento. Isto poderá ser explicado pela física no chamado *tubo venturi*, que é conhecido, no estudo da energia eólica, como “efeito túnel”.

Em um terreno aberto, se a velocidade for 6 m/s poderá ter um aumento de até 50%, ou seja, poderá alcançar até 9 m/s, se as condições geográficas apresentarem o efeito túnel.

Assim, situar um aerogerador, em um túnel desse tipo, poderá ser uma forma inteligente de obter velocidades do vento superiores às das áreas vizinhas, desde que o túnel esteja suavemente encravado na paisagem. Caso contrário, se as colinas são muito acidentadas, poderá haver muitas turbulências nessa área, e o vento soprará em muitas direções diferentes com mudanças rápidas de direção.

Se houver muitas turbulências, a suposta vantagem obtida com o ganho de velocidade será anulada pelas mudanças da direção do vento que poderão causar rupturas e desgastes desnecessários ao aerogerador.

2.6.7 Densidade do ar

A energia cinética contida em um corpo em movimento depende de sua velocidade e é proporcional à sua massa. Portanto, a energia cinética contida no vento depende da densidade do ar, quer dizer, de sua massa por unidade de volume. Resumindo, quanto mais denso for o ar, maior quantidade de energia cinética poderá ser transferida para a turbina. (FARIAS, 2000).

2.6.8 Distribuição da pressão do ar na parte anterior e posterior ao rotor

A Figura 15 mostra a pressão do ar no eixo vertical, sendo o eixo horizontal a distância ao plano do rotor. O vento chega pela direita, ficando o rotor situado no centro do gráfico.

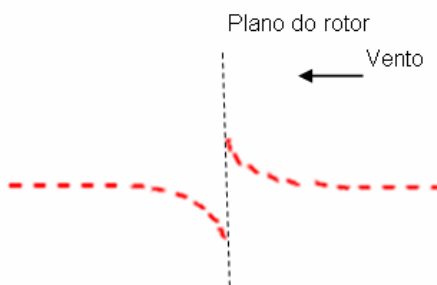


Figura 15 – Distribuição de pressão antes e depois do rotor
Fonte: Disponível em: <<http://www.windpower.dk>>

A pressão do ar aumenta, gradativamente, à medida que o vento se aproxima do rotor pela direita, atuando como uma barreira à passagem do vento. Pode-se observar que a pressão do ar cai imediatamente após o plano do rotor, para, em seguida, aumentar, gradualmente, até o nível de pressão normal da área.

A densidade do ar poderá ser estimada pela equação apresentada a seguir, onde não foi considerada a pressão de vapor, pois sua influência é muito pequena.

$$P = 1,2929 \cdot \frac{P_v}{760} \cdot \frac{273}{T} \quad (2.6)$$

onde: P_v = pressão atmosférica em mm de Hg

T = temperatura do ar em grau Kelvin.

2.7 Medição da velocidade do vento (anemômetros)

A velocidade do vento, normalmente, é medida utilizando-se um anemômetro que poderá ser de conchas, conforme a Figura 16:



Figura 16: Anemômetro de conchas
Fonte: Fotografia do autor

O anemômetro de conchas tem um eixo vertical e três conchas que captam o vento. O número de rotações por segundo é registrado eletronicamente. Normalmente, o anemômetro possui uma veleta para detectar a direção em que o vento está soprando.

No lugar das conchas, o anemômetro poderá estar equipado com hélices, apesar de não ser o mais habitual.

Outros tipos de anemômetros poderão ser utilizados, como, por exemplo, os que utilizam ultra-som ou laser que servem para detectar a defasagem do som ou da luz coerente, refletida pelas moléculas de ar. Também poderão ser utilizados anemômetros que possuem

fios eletricamente aquecidos que detectam a velocidade do vento através de pequenas diferenças de temperaturas entre cabos situados ao vento e na sombra do vento.

Para a avaliação de um determinado local com relação ao potencial eólico, é necessário utilizar-se um equipamento para medir a velocidade do vento com relativa precisão, pois, caso contrário, o resultado poderá ser desastroso. Como a potência contida no vento é função da velocidade ao cubo, um pequeno erro de velocidade poderá representar um valor significativo na potência, erro esse que ainda será agravado quando for medida a velocidade do vento em uma determinada altura e projetada para a altura que será instalado o rotor.

2.7.1 Escolha do tipo de torre para a instalação dos rotores e dos equipamentos de medição

Para evitar o abrigo do vento, em vez de torres treliçadas, é conveniente serem utilizados postes cilíndricos esbeltos nos quais poderão ser instalados os mecanismos de medição do vento. Esses postes são instalados a partir de *kits* de fácil montagem, podendo ser colocados os anemômetros na altura de funcionamento dos rotores o que garante uma maior precisão nas medições realizadas.

2.7.2 Intervalos de medição

As velocidades do vento são medidas em médias de 10 minutos, para que haja compatibilidade com a maioria dos programas-padrão (inclusive com a bibliografia sobre o vento). Os resultados das velocidades do vento serão diferentes se forem utilizados intervalos diversos para o cálculo das médias.

2.8 Sistema de armazenamento de energia

Atualmente, armazenar energia em baterias tem sido o recurso mais utilizado devido às vantagens econômicas. Os sistemas de armazenamento são modulares e podem-se utilizar várias baterias, possibilitando o armazenamento de grande quantidade de energia. (MANWELL et al., 2003).

Segundo Aldabó (2001), as baterias que poderão ser utilizadas nos sistemas de energia renovável, como energia solar, eólica ou sistemas híbridos, deverão ser projetadas pelos ciclos de carga profunda. Há, no mercado, várias marcas e tipos de baterias que poderão ser empregadas nesses sistemas, sendo importante selecionar a bateria que satisfaça à configuração do sistema utilizado. Seguindo-se as recomendações do fabricante, uma bateria poderá apresentar um tempo de vida útil, em torno de 5 (cinco) a 10 (dez) anos, podendo alguns tipos alcançarem até 20 (vinte) anos.

A capacidade de uma bateria é apresentada em ampere-hora (Ah) sendo 1 Ah o fornecimento de corrente de 1 A durante o período de uma hora.

Os tipos de baterias mais utilizados em sistemas eólicos, solares ou híbridos são as de chumbo-ácidas ou alcalinas. As baterias alcalinas poderão ser do tipo níquel-cádmio ou níquel-ferro. As baterias do tipo níquel-cádmio apresentam custo muito elevado e possuem um potencial poluente que não permite serem descartadas diretamente na natureza. As baterias alcalinas – tipo níquel-ferro – não são muito utilizadas nos sistemas de energia renováveis devido à alta tensão necessária para o processo de recarga.

O correto dimensionamento de um banco de baterias deverá levar em consideração a capacidade de armazenamento desejada, taxa (vazão) de descarga, vazão de carga e temperatura mínima do local onde a bateria será usada. Para as baterias chumbo-ácidas, a temperatura é um fator importante a ser considerado, pois a capacidade da bateria cai, sensivelmente, com a diminuição da temperatura.

Segundo Gordon (apud FARIAS, 2000), as baterias para aplicações eólicas precisam apresentar as seguintes características:

- a) resistência a ciclos de carga e descarga, diariamente e por períodos prolongados;
- b) possibilidade de descargas profundas;
- c) operação fácil e confiável, com mínima manutenção possível;
- d) resistência mecânica para suportar o transporte para áreas remotas;
- e) alta eficiência de recarga;
- f) baixa descarga espontânea;
- g) instalação simples e sem necessidade de mão-de-obra especializada;
- h) confiabilidade e vida útil elevada;
- i) possibilidade de operar com as temperaturas mais diversas possíveis.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Radiação solar ao nível do solo

Da radiação solar que chega até a atmosfera, uma parcela é refletida, outra absorvida e apenas uma fração atinge o solo sob a forma de uma componente direta ou difusa.

Se a superfície receptora estiver inclinada em relação à horizontal, haverá uma outra componente que será a refletida pelo ambiente (solo, vegetação, terrenos rochosos, etc.), nas proximidades do corpo receptor cujo coeficiente de reflexão é chamado de “albedo”.

As características da radiação solar – intensidade, distribuição espectral e angular – são alteradas devido às influências provocadas pelos efeitos de absorção e espalhamento. Essas modificações, provocadas pela interação com a atmosfera, dependem da espessura da camada atmosférica, que é identificada por um coeficiente denominado “massa de ar” (MA, que assume valores entre 0 e 2), conforme pode ser visto na Figura 17, a seguir, sendo, portanto, dependente do ângulo zenital do sol, da distância entre Terra e Sol, das condições atmosféricas e meteorológicas. (OLIVEIRA, 1997).

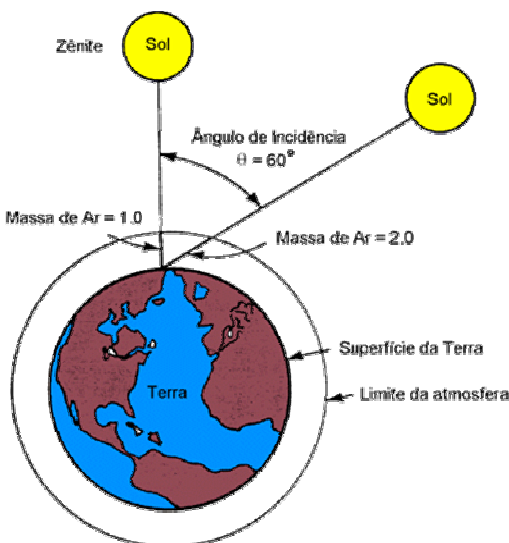


Figura 17 – Ângulo de incidência solar
Fonte: CRESESB

Em função da alternância de dias e noites, estações do ano, de nuvens e de dias chuvosos, o potencial energético solar apresenta grandes variações, induzindo à utilização de um sistema de armazenamento adequado às circunstâncias de demanda.

3.2 Procedimento de cálculo da radiação solar no plano do painel

Se considerar-se um coletor solar ou módulo fotovoltaico com posicionamento baseado nos seguintes fatores:

- a) latitude = λ ;
- b) inclinação em relação à horizontal = β (negativo faceando o norte);
- c) azimute (ângulo entre a projeção da normal e a linha norte): positivo no sentido horário.

Também deve ser considerada a nomenclatura a seguir para a radiação solar no plano horizontal:

- a) radiação solar total diária, média mensal = H_h ;
- b) radiação solar difusa diária, média mensal = H_d ;
- c) radiação solar extraterrestre diária, média mensal = H_0 ;
- d) índice de transmitância atmosférica = $K_t = H_h/H_0$.

A radiação solar diária, média mensal que incide no plano do coletor, H_{col} , poderá ser calculada pela seguinte equação:

$$H_{col} = \left(R_h - R_d \cdot \frac{H_d}{H_h} \right) \cdot H_h \quad (3.1)$$

onde: H_h , normalmente, são dados obtidos nos atlas solarimétricos;

R_h e R_d são fatores de conversão da radiação solar no plano horizontal, convertidos para o plano do coletor;

$\frac{H_d}{H_h}$ é obtido a partir de correlações com K_t .

A seguir, são apresentados alguns cálculos intermediários utilizados.

a) Ângulo do pôr do sol

$$\omega_s = \ar \cos(-tg(\lambda)tg(\delta)) \quad (3.2)$$

b) Ângulo do pôr do sol para o plano inclinado:

$$\omega_{s'} = \ar \cos(-tg(\lambda)tg(\delta)) \quad (3.3)$$

$$H_0 = \left(\frac{24}{\pi} \right) \cdot 3600.1367 \cdot \left(\frac{W}{m^2} \right) \cdot \frac{(1 + 0,033 \cdot \cos(2\pi(n-2)))}{365} \cdot (\cos\lambda \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right) \cdot \sin\lambda \cdot \cos\delta) \quad (3.4)$$

onde δ é a declinação e n o número de dias, a partir do dia primeiro de janeiro do calendário do Ano Juliano.

Realizados os cálculos acima, os fatores R_h e R_d poderão ser obtidos mediante as seguintes equações:

$$R_h = \left\{ \left[\frac{\cos(\lambda - \beta)}{\cos \lambda} + \frac{\rho_{solo}}{2} (1 - \cos \beta) \right] \cdot \left[a \cdot \sin(\omega_c) + \frac{b}{2} \sin(\omega_c) \cos(\omega_c) + \frac{\omega_c \cdot \pi}{180^\circ} \right] \right\} - \left\{ \left[\frac{\cos(\lambda - \beta)}{\cos(\lambda)} \cos(\omega_{s'}) + \frac{\rho_{solo}}{2} (1 - \cos \beta) \cdot \cos(\omega_s) \right] \cdot \left[\frac{a \cdot \omega_c \cdot \pi}{180^\circ} + b \cdot \sin(\omega_c) \right] \right\} \quad (3.5)$$

$$R_d = \frac{1}{d} \left\{ \left[\frac{\cos\lambda - \beta}{\cos\lambda} - \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) \right] \sin(\omega_c) - \left[\frac{\cos\lambda - \beta}{\cos\lambda} \cos(\omega_s) - \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) \cos(\omega_s) \right] \frac{\omega_s \cdot \pi}{180^\circ} \right\} \quad (3.6)$$

onde:

$$a = 0,4090 + 0,5010 \operatorname{sen}\left(\left(\varpi_s - 60^\circ\right) * \frac{\pi}{180}\right) \quad (3.7)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \operatorname{sen}\left(\left(\varpi_s - 60^\circ\right) * \frac{\pi}{180}\right) \quad (3.8)$$

$$d = \operatorname{sen}(\omega_s) - \left(\frac{\omega_s \pi}{180}\right) \cos\left(\frac{\omega_s \pi}{180}\right) \quad (3.9)$$

A relação entre $\frac{H_d}{H_h}$, radiação solar diária, média mensal e radiação solar total, média mensal poderá ser calculada pela equação:

$$\frac{H_d}{H_h} = 0,775 + 0,347 \cdot \frac{(\omega_s - 90^\circ) \cdot \pi}{180^\circ} - \left[0,505 + 0,261 \cdot \frac{(\omega_s - 90^\circ) \cdot \pi}{180^\circ} \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot (K_t - 0,9)}{\pi}\right) \right] \quad (3.10)$$

$$\text{onde } K_t = \text{índice de transmitância atmosférica} = \frac{H_d}{H_h} \quad (3.11)$$

(TIBA, 1998)

3.3 Painel fotovoltaico

Uma das características dos geradores fotovoltaicos é a sua modularidade. Quando for necessário um aumento na capacidade de geração para se adequar à demanda, é com muita facilidade que se pode adicionar novos painéis ao sistema.

Se várias células solares idênticas são conectadas em série, a corrente gerada pela associação será a de uma única célula, mas a tensão será acrescida n vezes.

$$I_{\text{ass}} = I_{c1} = I_{c2} \dots = I_{cn} \quad (3.12)$$

$$V_{\text{ass}} = V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} + \dots = nV_{c1} \quad (3.13)$$

onde I_{ass} e V_{ass} são a corrente e a tensão da associação das células.

Se n células idênticas são conectadas em paralelo, a tensão será a mesma de uma única célula, e a corrente será incrementada n vezes.

$$I_{\text{ass}} = I_{c1} + I_{c2} \dots + I_{cn} = nI_{c1} \quad (3.14)$$

$$V_{\text{ass}} = V_{c1} = V_{c2} \dots = V_{cm} \quad (3.15)$$

Essa característica permite a construção de módulos fotovoltaicos com tensão entre 12, 24 e 48 volts, em função do número e da disposição das células conectadas.

Pode-se explicar o funcionamento do módulo de maneira análoga à utilizada para o circuito equivalente da Figura 8, utilizando-se a equação a seguir:

$$I_{\text{mod}} = N_p \left[I_f - I_o \left(e^{\frac{V_{\text{mod}} + I_{\text{mod}} R_s}{mV_t N_s} - 1} \right) - \frac{V_{\text{mod}} + I_{\text{mod}} R_s}{R_p} \right] \quad (3.16)$$

onde as resistências (R_s e R_p) se referem ao módulo como um todo; I_{mod} e V_{mod} são a corrente e a tensão do módulo; e N_p e N_s são o número de células conectadas em paralelo e série. (GARCIA, 2001).

3.4 Energia eólica

O Sol irradia, anualmente, $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia que incide sobre o globo terrestre. Em torno de 1% a 2% dessa energia, proveniente do Sol, é convertida em energia eólica. Isso supõe uma energia ao redor de 50 a 100 vezes superior à energia convertida em biomassa por todas as plantas da Terra. (www.windpower.org).

3.4.1 Classe e longitude de rugosidade

Na indústria eólica, comumente, é feita a referência à classe ou às dimensões de rugosidade, quando se trata de avaliar as condições eólicas de uma paisagem. Uma alta rugosidade de classe 3 ou 4 refere-se a uma paisagem com muitas árvores e edifícios; já a superfície do mar corresponde a uma rugosidade de classe 0; as pistas de concreto dos aeroportos pertencem à classe de rugosidade 0,5, igual a uma paisagem aberta de um campo de pastagem para ovelhas (Tabela 4).

O comprimento de rugosidade é a distância sobre o nível do solo em que, teoricamente, a velocidade do vento seria nula.

Tabela 4: Classes e comprimentos de rugosidade

Classe de rugosidade	Comprimento de rugosidade (m)	Tipo de paisagem
0	0,0002	Superfície da água
0,5	0,0024	Terreno completamente aberto com uma superfície lisa, p.ex., pistas de concreto nos aeroportos, gramado cortado, etc.
1	0,03	Área agrícola aberta, sem cercados nem tapumes e com edifícios muitos dispersos. Somente colinas suavemente arredondadas.
1,5	0,055	Terreno agrícola com algumas casas e cercas de proteção de 8 metros de altura com uma distância aproximada de 1250 m.
2	0,1	Terreno agrícola com algumas casas e cercas de proteção de 8 metros de altura com uma distância aproximada de 500 m.
2,5	0,2	Terreno agrícola com muitas casas, arbustos y plantas, ou cercas de proteção de 8 metros de altura com uma distância aproximada de 250 m.
3	0,4	Povoados, cidades pequenas, terreno agrícola, com muitas ou altas cercas de proteção, bosques e terreno acidentado e muito desigual
3,5	0,8	Cidades maiores com edifícios altos
4	1,6	Cidades maiores com edifícios altos e arranha-céus.

Fonte: Disponível em: <<http://www.windpower.dk>>

3.4.2 Cisalhamento do vento

O fato de que o perfil do vento se move com velocidades mais baixas, conforme se aproxima do nível do solo, costuma se chamar “cisalhamento do vento”.

Por exemplo, se considerar-se um aerogerador instalado a 40 m e com um diâmetro de rotor de 40 m, pode-se observar que o vento soprará a 9,3 m/s, quando o extremo da pá se encontrar na posição mais elevada, e a 7,7 m/s quando a extremidade da pá se encontrar na posição inferior. Isso significa que as forças que atuam sobre as pás do rotor, quando estas se encontrarem na posição mais alta, serão maiores do que em suas posições mais baixas.

- **Perfil vertical do vento:** A velocidade do vento, a certa altura, sobre o nível do solo poderá ser representada pela seguinte equação:

$$V = V_{\text{ref}} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{\text{ref}}}{z_0}\right)} \quad (3.17)$$

onde v é a velocidade do vento a uma altura z sobre o nível do solo; V_{ref} é a velocidade de referência, quer dizer, uma velocidade do vento já conhecida a uma altura z_{ref} ; Z é a altura sobre o nível do solo para a velocidade desejada v e z_0 é a longitude de rugosidade na direção do vento atual; Z_{ref} é a altura de referência, ou seja, a altura que se conhece a velocidade do vento exata v_{ref} . No exemplo citado anteriormente, assume-se que a 20 m o vento está soprando a 7,7 m/s. e se quer conhecer a velocidade do vento a 60m de altura. Se a longitude de rugosidade é de 0,1m, então:

$$V_{\text{ref}} = 7,7 \quad z = 60 \quad z_0 = 0,1 \quad Z_{\text{ref}} = 20 \quad (3.18)$$

$$V = 7,7 \frac{\ln\left(\frac{60}{0,1}\right)}{\ln\left(\frac{20}{0,1}\right)} = 9,2966 \text{ m/s} \quad (3.19)$$

(<<http://www.windpower.dk>>)

- **Desvio do vento ao passar pelo rotor do aerogerador:** Na realidade, o vento será desviado antes mesmo que ele chegue ao nível do plano do rotor. Isto significa que não é possível capturar toda a energia contida no vento, utilizando um aerogerador, o que pode ser visto, a partir da lei de Betz. Na Figura 18, pode-se observar o comportamento do vento que está passando por um rotor de três pás, e o seu desvio, antes mesmo de chegar ao plano do rotor.

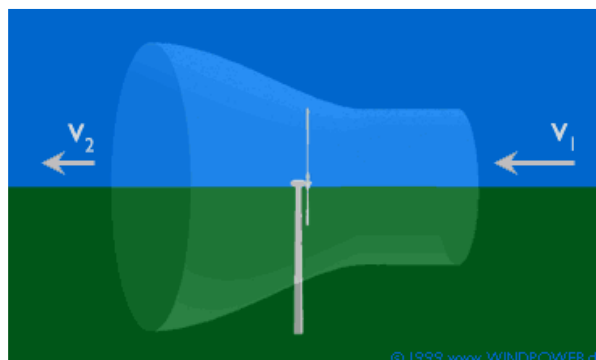


Figura 18 – Redução da velocidade do vento no rotor
 Fonte: Disponível em: <<http://www.windpower.dk>>

- **Lei de Betz:** A Lei de Betz diz que se pode converter, no máximo, $16/27$ (59%) da energia cinética em energia mecânica, utilizando um aerogerador. Essa lei foi formulada pelo físico Alemão Albert Betz, em 1919. Seu livro **Wind Energie**, publicado em 1926, proporcionou grande parte do conhecimento que se têm, nos dias atuais, sobre energia eólica e aerogeradores. O mais surpreendente é que é possível fazer-se uma afirmação tão abrangente, podendo ser aplicada a qualquer aerogerador com um rotor em forma de disco.
- **Demonstração da Lei de Betz:** Considerando a velocidade média do vento, através da área do rotor, como velocidade do vento anterior à turbina, sem perturbação do rotor como v_1 e a velocidade do vento após a passagem pelo rotor como v_2 , sua velocidade média.

$$v_m = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (3.20)$$

A massa da corrente de ar através do rotor, por segundo, será:

$$\dot{m} = F \frac{(V_1 + V_2)}{2} \rho \quad (3.21)$$

onde \dot{m} é igual à massa de ar por segundo, e F é a área varrida pelo rotor, e

$\frac{(V_1 + V_2)}{2}$ é a velocidade média do vento através da área do rotor.

De acordo com a segunda lei de Newton, a potência do vento extraída pelo rotor é:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (V_1^2 + V_2^2) \quad (3.22)$$

Substituindo a equação 3.21 na equação 3.22, obtém-se a seguinte expressão para a potência:

$$P = \frac{\rho}{4} (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) F \quad (3.23)$$

Agora, compara-se este resultado com a potência total de uma corrente de vento não perturbada através da mesma área F, sem nenhum rotor que bloqueie o vento. Esta potência será chamada de P_0 :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho V_1^3 F \quad (3.24)$$

A razão entre a potência que se extraiu do vento e a potência do vento sem ser perturbada pelo rotor será:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \right) \quad (3.25)$$

Fazendo o gráfico de $\frac{P}{P_0}$, em função de $\frac{V_2}{V_1}$, como está mostrado na

Figura 19, pode-se observar que a função alcança seu máximo para $\frac{V_2}{V_1} = 1/3$, e que o valor máximo da potência extraída do vento é de 59% ou $16/27$ da potência total do vento.

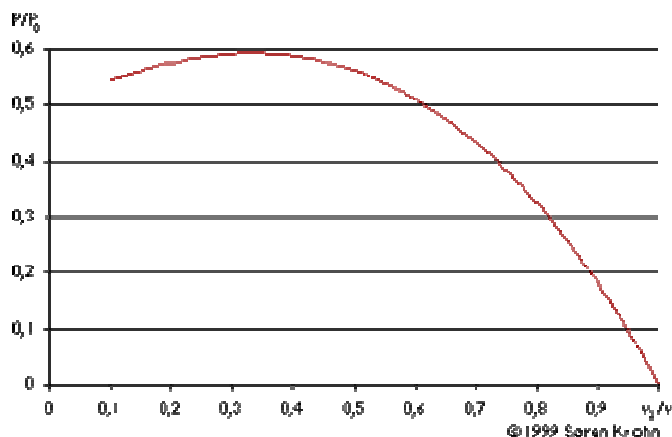


Figura 19– Gráfico de P/P_o em função de v_2/v_1
 Fonte: Disponível em: <<http://www.windpower.dk>>

- **Energia do vento:** Um aerogerador obtém sua potência de entrada, convertendo a força do vento em torque (força de giro), atuando sobre as pás do rotor. A quantidade de energia transferida para o rotor pelo vento depende da densidade do ar, da área varrida pelo rotor e da velocidade do vento.

A energia gerada pelo sistema poderá ser calculada utilizando a potência do sistema, que varia em função da velocidade do vento, multiplicando-se pelo tempo de operação na velocidade considerada. Sendo, portanto, a energia total gerada igual a integral, no tempo, da potência (HIRATA; ARAÚJO, 2000). A Figura 20 ilustra o fenômeno.

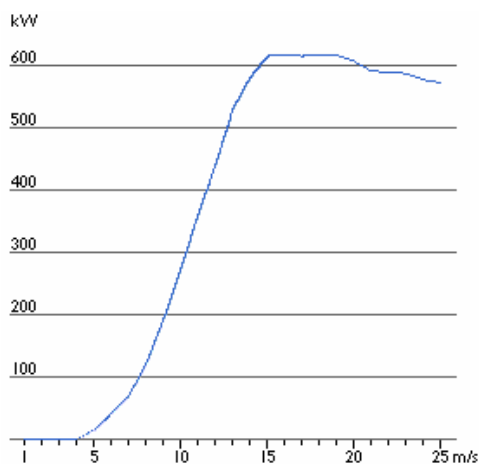


Figura 20 – Curva de potência de uma turbina eólica
 Fonte: Disponível em: <<http://www.windpower.dk>>

- **Potência do vento:** A velocidade do vento é um fator muito importante para avaliar-se a quantidade de energia que um aerogerador pode transformar em eletricidade. A energia contida no vento varia com o cubo da velocidade média desenvolvida pelo vento.

Considerando um fluxo laminar e perpendicular à seção de um cilindro, deslocando-se com velocidade V , a energia cinética E poderá ser expressa por:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (3.26)$$

onde m é a massa de ar contida no cilindro de área A .

Como a potência é a energia na unidade de tempo, a equação 3.26 pode ser expressa em termos de potência por:

$$\frac{E}{t} = \frac{1}{2} m \cdot \frac{v^2}{t} \quad (3.27)$$

e considerando que m/t é a taxa de fluxo de ar num cilindro de comprimento L , ou seja, $\frac{\rho AL}{t}$ onde ρ é a densidade da massa de ar, substituindo $\frac{L}{t} = V$, pode-se escrever a potência como:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (3.28)$$

A partir da equação (3.28), pode-se definir a densidade de potência pela seguinte equação:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \quad (3.29)$$

Usando a equação (3.29) pode-se confeccionar uma tabela com o potencial eólico para diversas velocidades do vento.

Tabela 5: Densidade de potência em função da velocidade do vento

Velocidade do vento (m/s)	Densidade de potência (W/m ²)
0	0
5	80
10	610
15	2070
20	4900
25	9560
30	16550

Fonte: Farias (2000)

3.5 Estatística aplicada à energia eólica

Normalmente, é necessário utilizar recursos estatísticos para estimar o potencial eólico de um determinado local. Quando se dispõe de algumas poucas informações, como a velocidade média diária ou mensal, pode-se fazer uma caracterização da distribuição da velocidade do vento, utilizando a função densidade de probabilidade. A seguir, serão apresentados alguns conceitos estatísticos direcionados a possibilitar a construção de uma modelagem da variação da velocidade do vento. (FARIAS, 2000).

3.5.1 Variáveis discretas e contínuas

A velocidade média do vento é uma importante grandeza estatística a ser utilizada na determinação do potencial energético produzido pelo vento. Por exemplo, quando se possui uma amostragem com certo número de velocidades u_i , pode-se obter a média desses valores através da equação a seguir:

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad \text{sendo } N \text{ o tamanho da amostra} \quad (3.30)$$

A moda e a mediana também são outras duas quantidades que poderão ser utilizadas. A **moda** tem como definição ser a quantidade que apresenta a maior frequência em um conjunto de dados, e a **mediana** será o número médio de um conjunto de dados, quando este estiver disposto em ordem crescente ou decrescente.

Outro parâmetro a ser considerado é a variância, cuja raiz quadrada positiva é chamada de desvio padrão que pode ser expresso por:

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum (u_i - \bar{u})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.31)$$

onde: : U = velocidade média

σ = desvio padrão

\bar{u} = valores médios da velocidade

u_i = valores de velocidade

m_i = frequência de cada intervalo

p = probabilidade

A probabilidade de uma variável discreta pode ser definida por:

$$P(u_i) = \frac{m_i}{N} \quad (3.32)$$

A soma total de todas as probabilidades será expressa por:

$$\sum_{i=1}^w p(u_i) = 1 \quad (3.33)$$

Se considerar-se um intervalo de valores, a probabilidade de certo valor de velocidade cair dentro do intervalo é definido por:

$$P(u_a \leq u \leq u_b) = \sum_{i=a}^b p(u_i) \quad (3.34)$$

Considerando uma variável contínua.

A probabilidade discreta $p(u_i)$ da equação (3.32) transforma-se na função densidade $f(u)$, e pode ser expressa por:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(u) du = 1 \quad (3.35)$$

Como a velocidade do vento não pode ser negativa, utiliza-se o seguinte intervalo:

$$\int_0^{+\infty} f(u) du = 1 \quad (3.36)$$

e a função cumulativa $F(u)$ é:

$$F(u) = \int_0^u f(x) dx \quad \text{onde } x \text{ representa a velocidade do vento sendo}$$

$$F(x=v) = f(v) \quad (3.37)$$

A função distribuição cumulativa $F(u)$ pode ser:

$$\frac{dF(u)}{du} = f(u) \quad (3.38)$$

A velocidade média pode ser expressa através da função densidade de probabilidade através de:

$$\bar{u} = \int_0^{\infty} u f(u) du \quad (3.39)$$

A variância é:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (u - \bar{u})^2 f(u) du \quad \text{ou} \quad (3.40)$$

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (u_i^2 - \bar{u}^2) f(u) du \quad (3.41)$$

3.5.2 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull se caracteriza pela utilização de dois parâmetros (FARIAS, 2000): um de forma (k) e outro de escala (c), e a função densidade de probabilidade é:

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right]; (k > 0, u > 0, c > 1) \quad (3.42)$$

e a função densidade cumulativa é:

$$F(u) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (3.43)$$

Pode-se obter a velocidade média do vento a partir da equação (3.39) que é:

$$\bar{u} = \int_0^{\infty} u \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] du \quad (3.44)$$

Para resolver esta integral adota-se $\left(\frac{u}{c} = u^*\right)$ e obtém-se:

$$\bar{u} = kc \int_0^{\infty} (u^*)^k \exp\left[-(u^*)^k\right] du^* \quad (3.45)$$

Fazendo-se $(u^*)^k = t$, a expressão acima torna-se:

$$\bar{u} = c \int_0^{\infty} (u^*)^k \exp[-(u^*)^k] du^* \quad (3.46)$$

A função gama é:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \exp[-t] dt \quad (3.47)$$

O desvio padrão da função de Weibull é:

$$\sigma = c \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (3.48)$$

E a probabilidade da velocidade do vento u ser igual ou maior que u_a é:

$$p(u \geq u_a) = \int_{u_a}^{\infty} f(u) du = e^{-\left(\frac{u_a}{c}\right)^k} \quad (3.49)$$

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para analisar o desempenho do sistema híbrido experimental, foram utilizadas cargas resistivas (lâmpadas incandescentes de 100 W, 150 W e 200 W), adequadas à quantidade de energia gerada através das fontes solar e eólica.

Foi feito o acompanhamento do nível de tensão do banco de baterias e da tensão gerada pelos painéis fotovoltaicos. A quantidade de energia gerada e utilizada na carga foi obtida através de um registrador semelhante aos utilizados pelas concessionárias de distribuição de energia. O intervalo de medições foi de 30 minutos sendo feito no período das 9h00min às 17h00min. No momento em que a tensão do banco de baterias atingia o nível de 22 Volts, era retirada a carga. Os valores utilizados para a construção das figuras 40 a 59 foram obtidos utilizando os procedimentos de cálculos apresentados a seguir.

Para a geração eólica, utilizou-se a equação $P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3$, considerando um rendimento para o aerogerador de 25%, de 90% para o controlador de carga, 90% para o banco de baterias, 90% para o inversor.

No rendimento para o aerogerador foi utilizado um valor considerado conservador de 25%, em função de os equipamentos que compõem o sistema apresentarem um pequeno desgaste provocado pelos seus 06 anos de operação.

A velocidade do vento utilizada foi a medida pelo anemômetro de conchas e registradas a média em cada intervalo de 10 minutos.

Os valores para a geração fotovoltaica foram obtidos com dados medidos pelo piranômetro registrados em médias de 10 minutos. O rendimento dos painéis fotovoltaicos foi considerado 12% e para controlador de carga, banco de baterias e inversor também 90%.

O rendimento para os painéis fotovoltaicos fornecidos pelo fabricante é de 14% para as condições padrão, radiação de 1000 W/m², temperatura da célula de 25°C. Como o painel opera fora dessas condições, foi adotado o rendimento de 12%.

4.1 Equipamentos utilizados

Os experimentos foram realizados no Laboratório do DTE (Dispositivos Térmicos e Especiais), localizado no Campus da Universidade Federal do Rio Grande do Norte na posição de 5° de latitude Sul. Os equipamentos utilizados para a realização dos experimentos

constam de uma turbina eólica de 750 W de potência nominal, quatro painéis solares fotovoltaicos, com 80 W de potência nominal cada um e um banco de baterias, composto por quatro baterias, modelo 12MC105, de descarga profunda, apresentando uma capacidade de 105 Ah. Foi utilizado um controlador de carga para o sistema eólico e um controlador de carga de 30 A para o sistema solar fotovoltaico. Também foi utilizado um inversor de tensão modelo Global com tensão de entrada de 24 volts CC e tensão de saída de 230 volts. Como carga do sistema, foram utilizadas três lâmpadas incandescentes de 200 W e uma de 150 W, totalizando uma carga de 750 W, simulando a carga de um motor elétrico de 1 cv de potência nominal, que é utilizado para o acionamento de uma bomba BCP existente no laboratório para bombeio de petróleo em um circuito fechado. Para a medição da velocidade e direção do vento, foi utilizado um anemômetro de conchas, e para a medição da radiação solar foi utilizado um pirômetro com silício fotovoltaico de alta sensibilidade.

4.1.1 Aerogerador

O aerogerador utilizado nos experimentos está equipado com um rotor de três pás com eixo horizontal e leme de direção, conforme pode ser visto na Figura 21.



Figura 21 – Turbina eólica

Modelo: AC 752; Velocidade de Arranque: 3 m/s;
Diâmetro: 2.4 m; Potência (W): 750 W; Voltagem:
24V

O aerogerador está instalado na extremidade de uma torre treliçada de 13m de altura.

4.1.2 Painel fotovoltaico

Para a geração fotovoltaica, foram utilizados quatro módulos fotovoltaicos constituídos de silício policristalino que utilizam células retangulares, conforme pode ser visto na Figura 22.

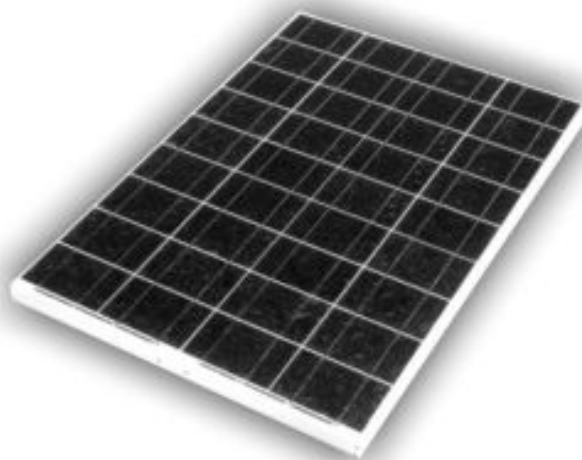


Figura 22 - Módulo fotovoltaico
Potência de saída Típica de 80Wp; KC 80; módulo policristalino de alta eficiência

- Características importantes dos módulos fotovoltaicos: A avançada tecnologia de processamento de célula e a produção através de sistemas automatizados, têm produzido módulos policristalinos de alta eficiência, sendo a eficiência de conversão das células acima de 14%.

As células são encapsuladas entre camadas de vidro temperado como cobertura, acetato de vinil etilênico e polivinil fluorídico, como fundo, para dar a máxima proteção contra os serenos e condições ambientais.

O laminado resultante é encapsulado em uma moldura de alumínio anodizado que oferece uma estrutura mais rígida e fácil instalação.

Salienta-se que as especificações elétricas estão sob condições de irradiação de 1 kW/m^2 , espectro de 1,5 de massa de ar e temperatura de célula de 25°C (Figuras 23, 24, 25, 26).

MODELO	KC80
MÁXIMA POTÊNCIA	80 Watts
VOLTAGEM DE MÁXIMA POTÊNCIA	16.9 Volts
CORRENTE DE MÁXIMA POTÊNCIA	4.73 Amps
VOLTAGEM DE CIRCUITO ABERTO	21.5 Volts
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	4.97 Amps
ALTURA	976 mm
LARGURA	652 mm
ESPESSURA	52 mm
PESO	8.0 Kg

Figura 23 – Especificações elétricas

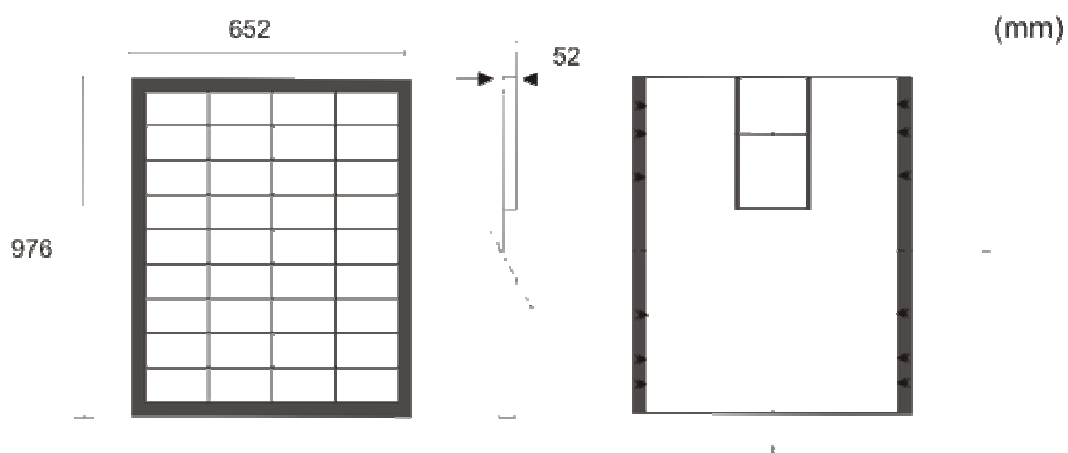


Figura 24 – Especificações físicas

Fonte:Kyocera. Disponível em: <<http://kyocerasolar.com.br/site/index.html>>.

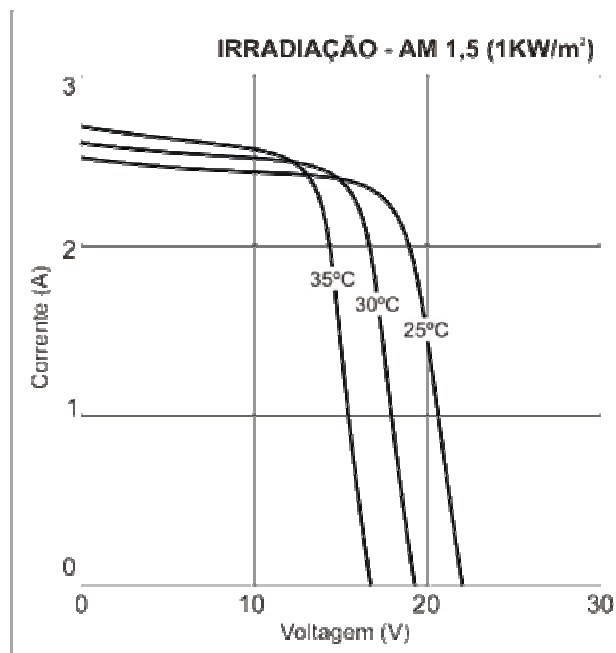


Figura 25 – Características de voltagem e corrente dos módulos fotovoltaicos KC80 em várias temperaturas de células
 Fonte: Kyocera. Disponível em: <<http://kyocerasolar.com.br/site/index.html>>.

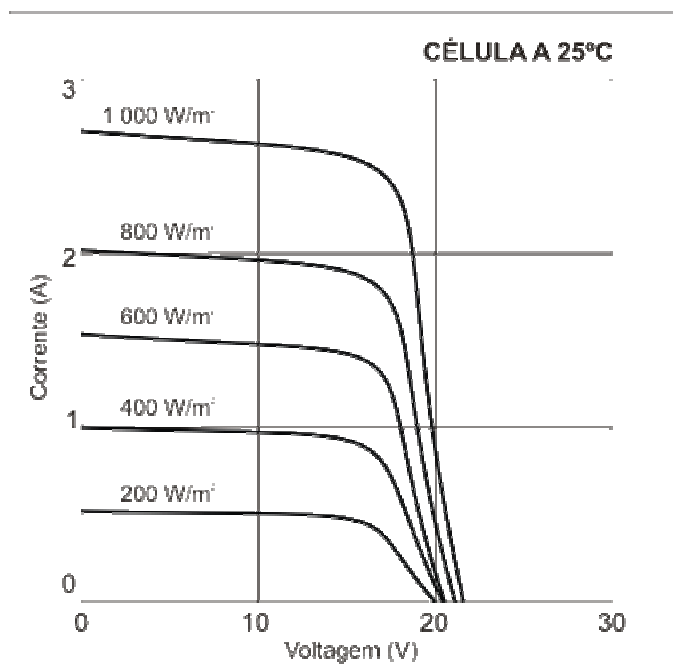


Figura 26 – Características de voltagem e corrente dos módulos fotovoltaicos em vários níveis de radiação
 Fonte: Kyocera. Disponível em: <<http://kyocerasolar.com.br/site/index.html>>.

4.1.3 Controladores de carga

O controlador de carga utilizado para o **sistema solar** foi o Total Control TCS-30/24 que apresenta as seguintes características:

- a) próprio para baterias chumbo-ácidas de 24 volts;
- b) controle de carga e flutuação (até 15 ou até 30 amperes, conforme o modelo);
- c) controle da saída (até 15 ou até 30 amperes, conforme o modelo), desligando-a quando a tensão da bateria cair para $21,6V \pm 2\%$, e religando-a quando a bateria, ao receber carga, atinge $25,5V \pm 2\%$. Este sistema é conhecido pelas siglas CMT (Corte por Mínima Tensão) ou LVD (*Low Voltage Disconnection*);
- d) uso de fusível tipo automotivo que proporciona proteção contra curto-circuito e inversão de polaridade na ligação à bateria;
- e) equipado com 5 LEDs, cujas indicações são:
 - e.1) **LED 1**: conexão invertida no painel solar ou na bateria (neste caso, ocorre queima do fusível);
 - e.2) **LED 2**: condição de **carga** da bateria: **apagado**, indica bateria não recendo carga, seja por falta de sol, fusível queimado, bateria desconectada ou defeituosa, ou, simplesmente, por haver sido atingida a carga completa (ver LEDs 3 a 5); **aceso**, bateria recebendo carga; **piscando**, carga total sendo atingida (início do regime de flutuação); quando a bateria se encontra totalmente carregada, os intervalos entre os lampejos do LED vão se tornando cada vez mais espaçados, podendo chegar a um intervalo de minutos. A indicação deste LED é equivalente à de um amperímetro de carga, isto é, ele acende somente quando a bateria está efetivamente recebendo carga.
 - e.3) **LEDs 3 a 5**: indicam a tensão da bateria: os três LEDs acesos indicam tensão máxima (bateria totalmente carregada); dois LEDs acesos indicam condição normal de tensão (faixa de utilização); apenas um LED aceso: tensão baixa, final do período de autonomia; apagados: indicam saída desativada, seja por mínima tensão (LVD) ou por fusível queimado, bateria desconectada, etc.

O Controlador com LVD, ligado entre um painel solar e uma bateria, funciona como um gerenciador de carga e descarga, mantendo a bateria dentro de condições ideais de funcionamento, assegurando, assim, longa vida útil. Ele controla carga, flutuação e, também, desliga a saída automaticamente, quando a bateria está com pouca carga, evitando que o usuário a descarregue totalmente, o que seria fatal para a vida útil da bateria.

4.1.4 Banco de baterias

O banco de baterias utilizado consta de 4 (quatro) baterias Moura, de 12 volts e 105 Ah de capacidade cada uma, conectadas duas a duas, em série, e estes dois conjuntos conectados em paralelo com o objetivo de obter uma tensão de saída de 24 volts, conforme pode ser visto na Figura 27, a seguir.

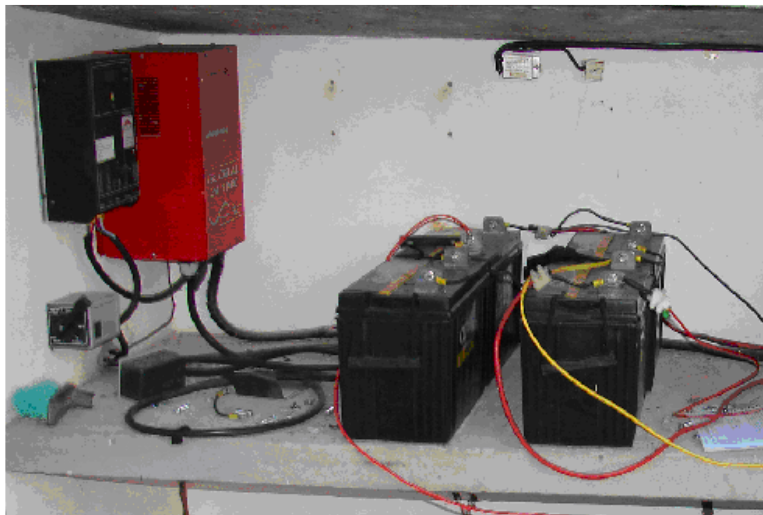


Figura 27 – Banco de baterias
Fonte: Fotografia do autor

4.1.5 Controlador de carga e Inversor

Foi utilizado um inversor modelo Global com entrada de corrente contínua de 24 volts, saída de corrente alternada de 230 volts e uma potência de 1000 watts que pode ser visto na Figura 28:



Figura 28 – Controlador de carga e inversor
Fonte: Fotografia do autor

4.1.6 Anemômetro

O anemômetro utilizado é o de conchas que está instalado a 13 metros de altura, correspondendo à altura do eixo do aerogerador, que possui as seguintes especificações técnicas (Figuras 29 e 30):

- a) início de medição com velocidade do vento de 0,78 m/s;
- b) capacidade de transformar o sinal em tensão com ondas senoidais, com frequência variando, linearmente, com a velocidade do vento;
- c) saída da tensão através de uma onda quadrada com a mesma frequência da velocidade do vento;
- d) velocidade máxima de medição para velocidade do vento de 96m/s.

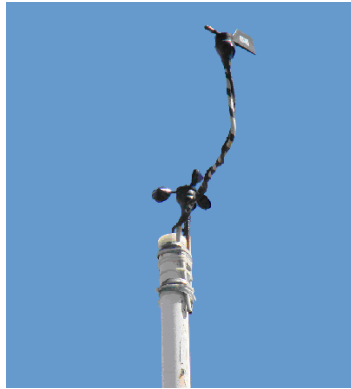


Figura 29 – Anemômetro e sensor direcional
Fonte: Fotografia do autor



Figura 30 – Detalhe do sensor direcional
Fonte: Fotografia do autor

4.1.7 Piranômetro

Foi utilizado um piranômetro com as seguintes características (Figura 31):

- a) Sinal de saída: corrente proporcional a radiação solar;
- b) Estabilidade: variação menor do que 2% durante o ano;
- c) Precisão: erro típico de 3% com variação máxima de 5%;
- d) Material do detector: silício fotovoltaico de alta sensibilidade.



Figura 31 – Piranômetro
Fonte: Fotografia do autor

4.1.8 Equipamento de aquisição de dados

É um instrumento utilizado para registrar os dados de velocidade e direção do vento e, também, para registrar a radiação global.

O registrador armazena, em um *chip*, os dados coletados que, em seguida, são transferidos para um computador. Um exemplo deste registrador é mostrado na Figura 32.



Figura 32 – Registrador de dados
Fonte: Fotografia do autor

Segundo Manwell et al., os dados obtidos pelos instrumentos de monitoração podem ser analisados de diversas maneiras, como por exemplo:

- a) Velocidade média dos ventos em um intervalo de tempo específico;
- b) Variação da velocidade em relação a um intervalo de amostra (ex: desvio padrão, intensidade de turbulência e picos de velocidade);
- c) Distribuição da direção do vento.

Os painéis fotovoltaicos foram instalados em uma estrutura que possibilita o ajuste do ângulo de inclinação para o melhor aproveitamento da radiação incidente, conforme pode ser visto a seguir, nas Figuras 33 a 38.

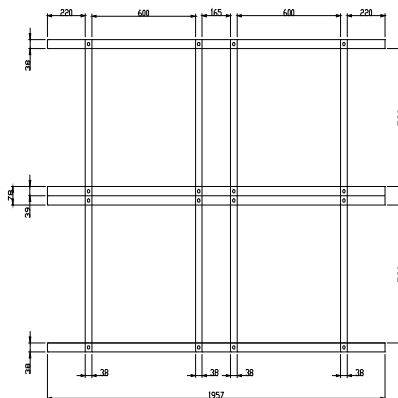


Figura 33 – Painel fotovoltaico: suporte dos painéis
Fonte: Elaborado pelo autor

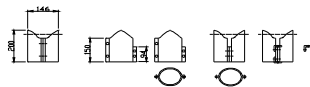


Figura 34 – Painel fotovoltaico: regulador de ângulo horizontal
Fonte: Elaborado pelo autor

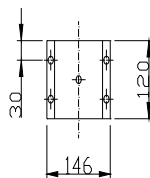


Figura 35 – Painel fotovoltaico: anel regulador das mãos francesas
Fonte: Elaborado pelo autor

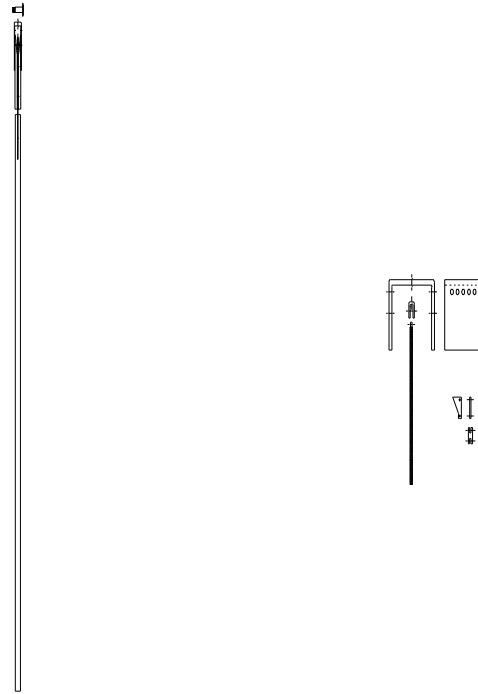


Figura 36 – Painel fotovoltaico: Montagem do regulador de ângulo
Fonte: Elaborado pelo autor

Para se obter a tensão de 24 volts, os painéis foram conectados dois a dois, em série, e os dois conjuntos foram conectados em paralelo.



Figura 37– Painel instalado no LABDTE
Fonte: Fotografia do autor



Figura 38 – Painel instalado no LABDTE
Fonte: Fotografia do autor

4.2 Processo de geração híbrida

A energia cinética contida na velocidade do vento impulsiona o rotor da turbina fazendo-o girar e, através do eixo, transmite este movimento rotativo para o rotor de um gerador síncrono, gerando energia elétrica com tensão de 24 volts alternada. Essa energia passa por um controlador de carga/retificador que faz o gerenciamento do nível de carga das baterias. A energia acumulada nas baterias, antes de alimentar a carga, passa por um inversor que a transforma em corrente alternada na tensão de 220 volts.

A energia contida na radiação solar é capturada por células solares fotovoltaicas, fabricadas a partir de silício policristalino, dispostas em painéis com 36 células, gerando energia elétrica corrente contínua na tensão de 12 volts. Esta energia gerada passa por um controlador de carga que gerencia o nível de carga das baterias. Após as baterias, o procedimento é o mesmo utilizado no sistema eólico.

O sistema de geração híbrida é, portanto, o resultado da energia capturada das duas fontes, eólica e solar, que, simultaneamente, é canalizada para o banco de baterias para posterior distribuição para as cargas, conforme pode ser visto na Figura 39.

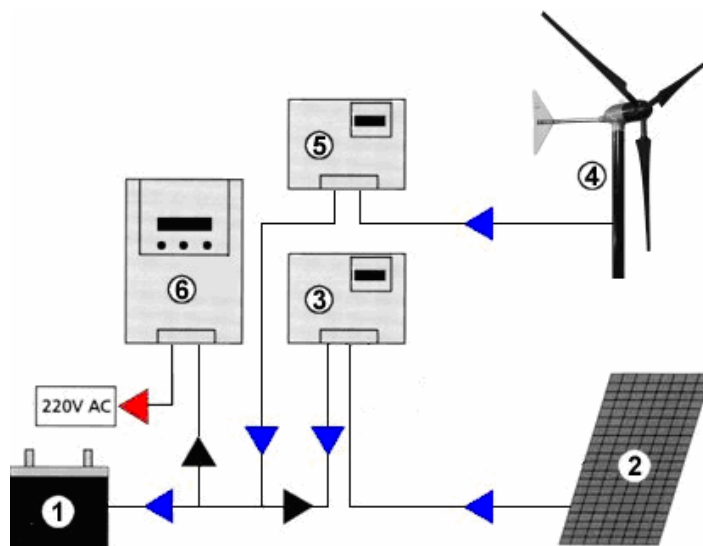


Figura 39 – Esquema de instalação do sistema híbrido.

1 Banco de baterias; 2. Painel fotovoltaico; 3. Controlador de carga do painel fotovoltaico; 4. Aerogerador; 5. Controlador de carga eólico; 6. Inversor CC AC

4.3 Custo aproximado do sistema híbrido (valores em reais)

O custo aproximado de 22.700 que consta na tabela 6 inclui despesas adicionais como taxas, transporte, etc.

Tabela 6: Custo do sistema híbrido

1) aerogerador	6.000,00
2) torre do aerogerador	3.000,00
3) controlador de carga eólico	600,00
4) painéis	2.000,00
5) suporte para os painéis	1.500,00
6) controlador de carga solar	500,00
7) anemômetro calibrado	800,00
8) torre dos sensores	1.000,00
9) piranômetro	1.500,00
10) banco de baterias	2.400,00
11) inversor DC/AC	900,00
12) registrador	2.500,00
TOTAL	22.700,00

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema híbrido utilizado para os experimentos é composto por uma turbina de 03 pás, potência nominal de 750 W, instalada a 13m de altura, conectada em paralelo com um sistema fotovoltaico composto de 04 módulos de potência nominal de 80 W cada um.

Os módulos fotovoltaicos estão conectados dois a dois em série e paralelo, produzindo uma tensão de 24 volts. As duas fontes de energia, solar e eólica, estão interligadas de maneira que possam alimentar um banco de baterias após a passagem pelos controladores de carga. Após as baterias, a energia, na forma de corrente contínua, passa por um inversor que a converte para corrente alternada, que será utilizada para o consumo.

5.1 Rendimento do sistema híbrido

Com os dados coletados e outros valores constantes das Tabelas dos Apêndices foram construídos os gráficos das Figuras e Tabelas deste capítulo para melhor visualização dos resultados.

Velocidade x Tempo (28/06/2007)

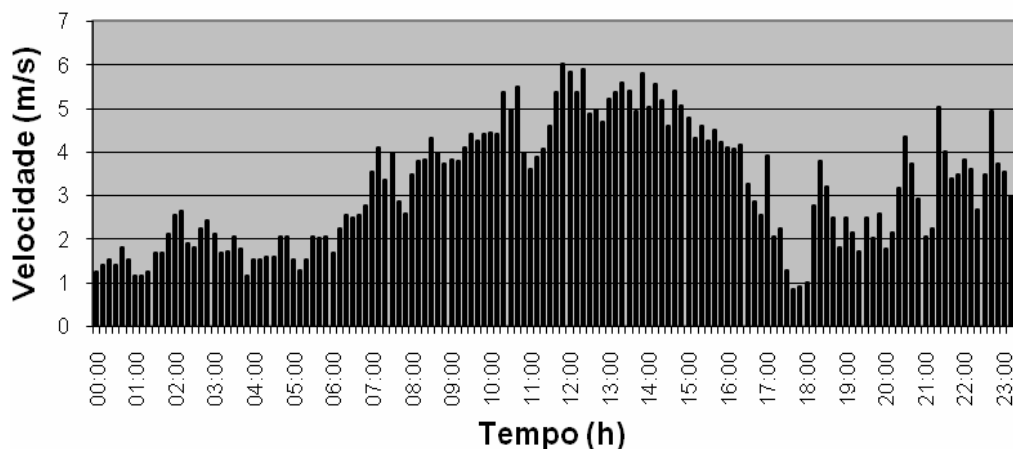


Figura 40 – Velocidade do vento

Analisando o gráfico da Figura 40, pode-se constatar que, no dia 28 de junho de 2007, a velocidade do vento não foi suficiente para gerar energia no intervalo das 00h00min até as 07h00min, e gerou muito pouco no intervalo das 16h30min até 23h50min.

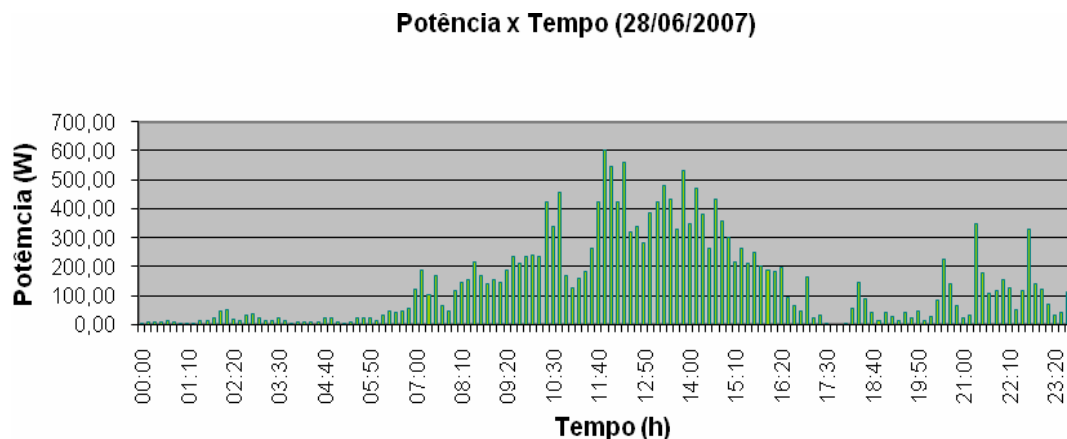


Figura 41 – Potência eólica disponível

Observando o gráfico da Figura 41, verifica-se que, no dia 28 de junho de 2007, a maior potência eólica disponível encontra-se no intervalo das 8h00min às 16h00min.

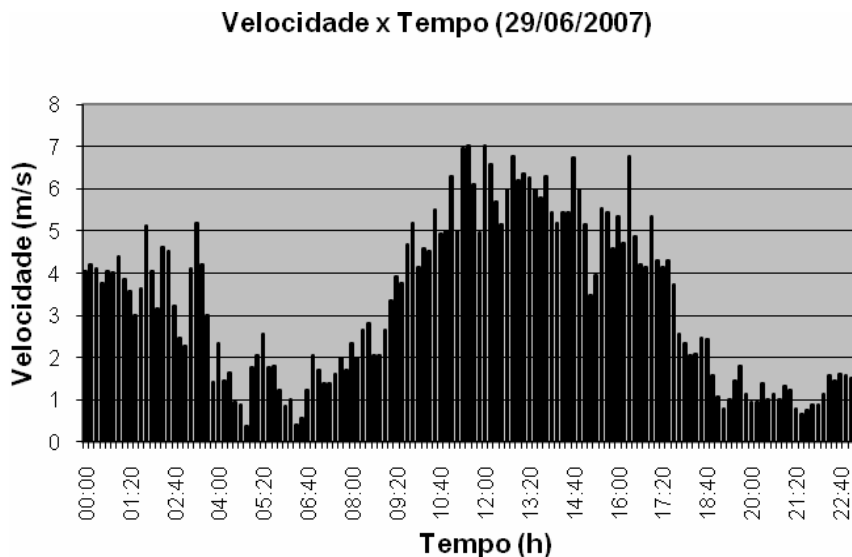


Figura 42 – Velocidade do vento

No dia 29 de junho de 2007, observa-se, na Figura. 42, que a velocidade do vento, com capacidade de gerar energia, encontra-se nos intervalos das 0h00min às 03h40min e das 09h30min às 18h00min.

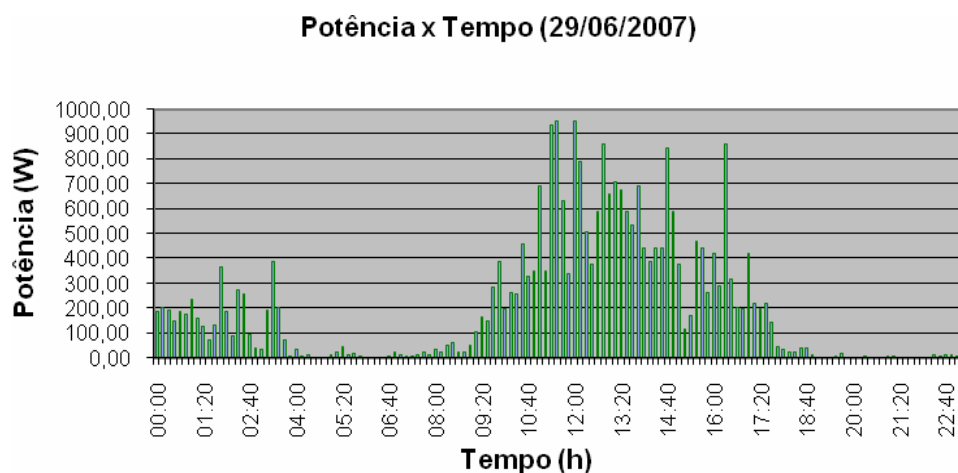


Figura 43 - Potência eólica disponível

No gráfico acima (Figura 43), constata-se que a potência eólica disponível, de maior relevância, concentra-se no intervalo das 09h30min até próximo das 17h00min.

O sistema híbrido operando apresentou o seguinte comportamento:

Tabela 7 – Monitoramento das tensões no dia 04/07/07

04/07/2007								
Hora	TS	TA	TB	TC	TD	TB'	TBB	TCE
9:00	25,1	17,7	19,1	6,2**	7,8**	12,4	24,8	25,9
9:30	24,8	16,7	18,9	6,2**	8,4**	12,2	24,1	24,8
10:00	23,9	9,6****	16,7	7,4****	14,6	11,7	23,4	24,1

Nota: TS - Tensão do sistema fotovoltaico
 TA - Tensão no módulo fotovoltaico A
 TB - Tensão no módulo fotovoltaico B
 TC - Tensão no módulo fotovoltaico C
 TD - Tensão no módulo fotovoltaico D
 TB' - Tensão em cada bateria
 TBB - Tensão no banco de bateria
 TCE - Tensão no banco de baterias medida pelo controlador eólico

** = sombra da torre do aerogerador

****= sombra cabo de aço

Observando a Tabela 6, verifica-se que dois painéis solares estão gerando uma tensão muito abaixo dos outros dois. Como a radiação solar incidente pode ser considerada a mesma, o motivo encontrado para a discrepância poderá ser o sombreamento provocado pela torre do aerogerador, conforme pode ser verificado na Figura 44 a seguir.



Figura 44 – Módulos fotovoltaicos com sombreamento momentâneo.

Tensão X Tempo

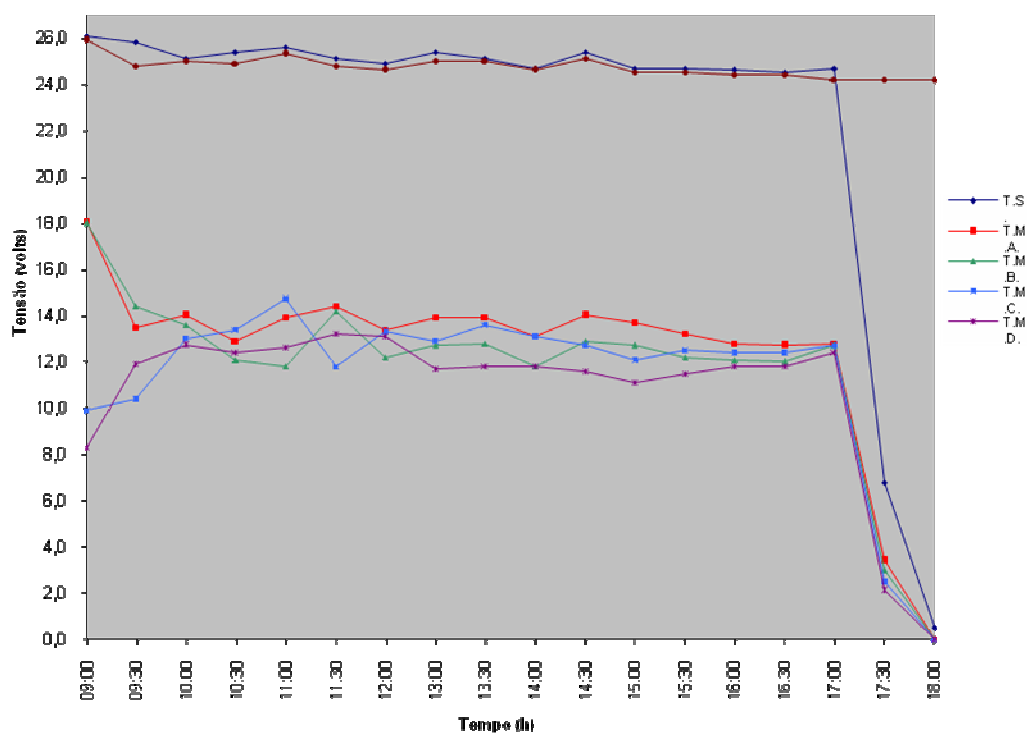


Figura 45 – Monitoramento das tensões no dia 28/06/2007: nos módulos do painel fotovoltaico (T.M.A., T.M.B.; T.M.C., T.M.D.); no sistema fotovoltaico (T.S.) e no banco de baterias (T.B.B.).

Observando-se o gráfico da Figura 45, constata-se que a tensão gerada pelo sistema fotovoltaico e pelos módulos cai sensivelmente a partir das 17 horas.

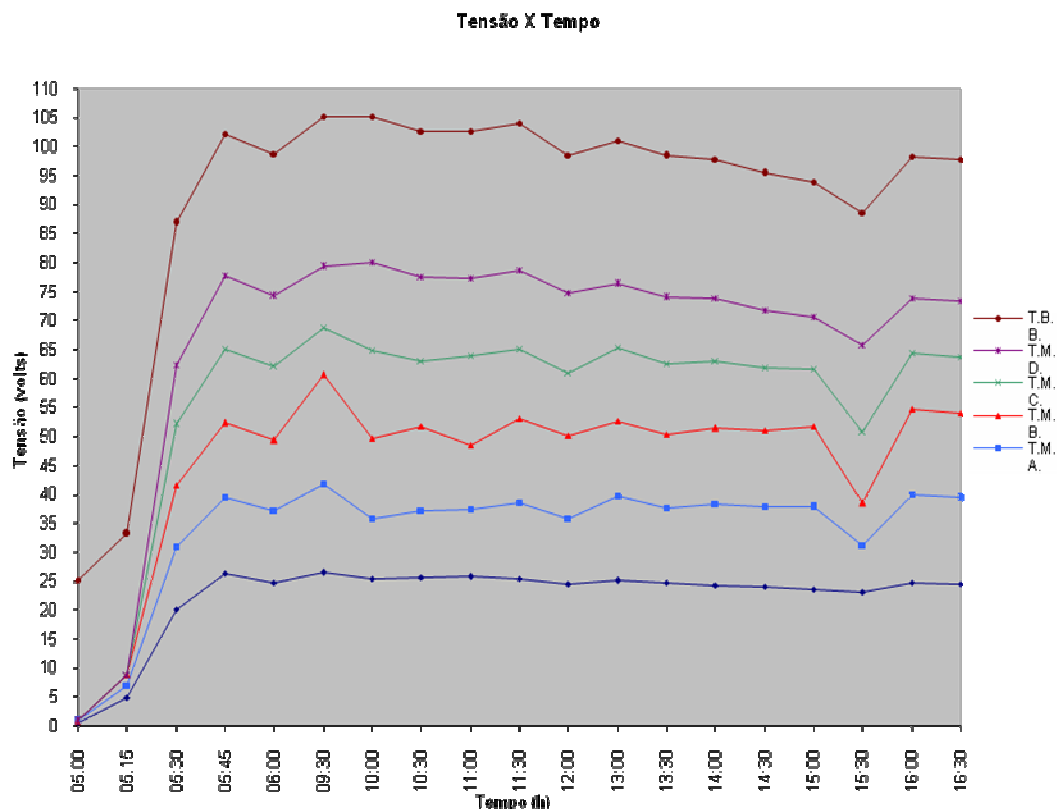


Figura 46 - Monitoramento das tensões no dia 03/07/2007: nos módulos do painel fotovoltaico (T.M.A., T.M.B., T.M.C. T.M.D.); no sistema fotovoltaico (T.S.) e no banco de baterias (T.B.B.)

Ainda na Figura 45 do dia 28/06/07, verifica-se que, às 17h30min, a tensão gerada cai para valores muito pequenos e que, às 18h00min, a tensão fica em zero.

Conforme a Figura 46, que representa a tensão gerada pelos painéis, no dia 03/07/07, constata-se que os painéis começam a gerar tensão a partir das 5h00min. A tensão, neste instante, é mínima, sendo o resultado da radiação difusa. A capacidade de gerar energia é insignificante.

Analisando o Gráfico da Figura 47, verifica-se que a radiação incidente no dia 29/06 localiza-se no intervalo das 7h00min às 16h00min com um intervalo de incidência mínima das 11h30min às 12h30min

Como pode ser observado na Figura 49, às 09h40min h foi conectado uma carga de 500W, que pode ser sustentada pela geração solar fotovoltaica e pela energia acumulada no Banco de Baterias até às 16h40min quando devido a queda de tensão do banco de baterias, esta carga teve que ser reduzida para 300W ficando conectada até às 19h15min. Totalizando 4,32kWh de energia utilizada pela carga.

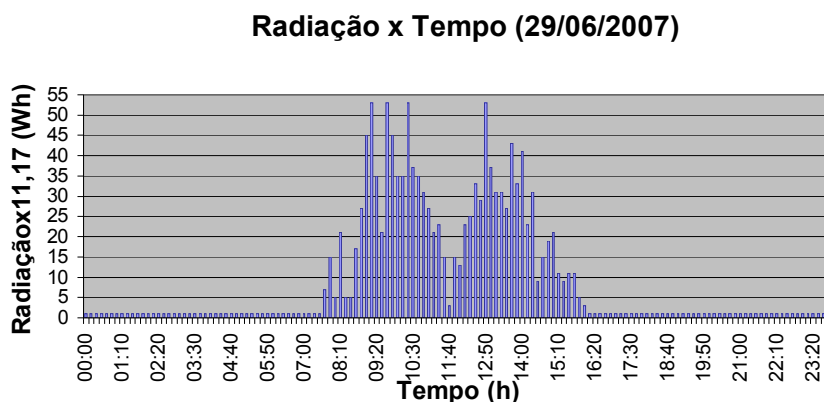


Figura 47 – Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 29/06/2007

Como pode ser observada na Figura 48 e Tabela D1, a energia gerada através da fonte solar, disponível na saída do inversor, é de 958,04 Wh, correspondendo a 22,2% da energia utilizada pela carga que foi de 4320 Wh. Como neste dia foi medida apenas a energia fotovoltaica gerada, conclui-se que 3361,96 Wh de energia utilizada pela carga é proveniente da energia acumulada no banco de baterias.

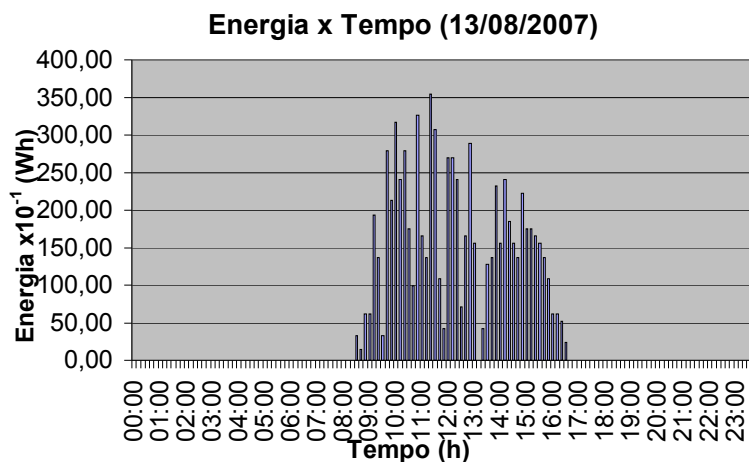


Figura 48 - Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 13/08/2007

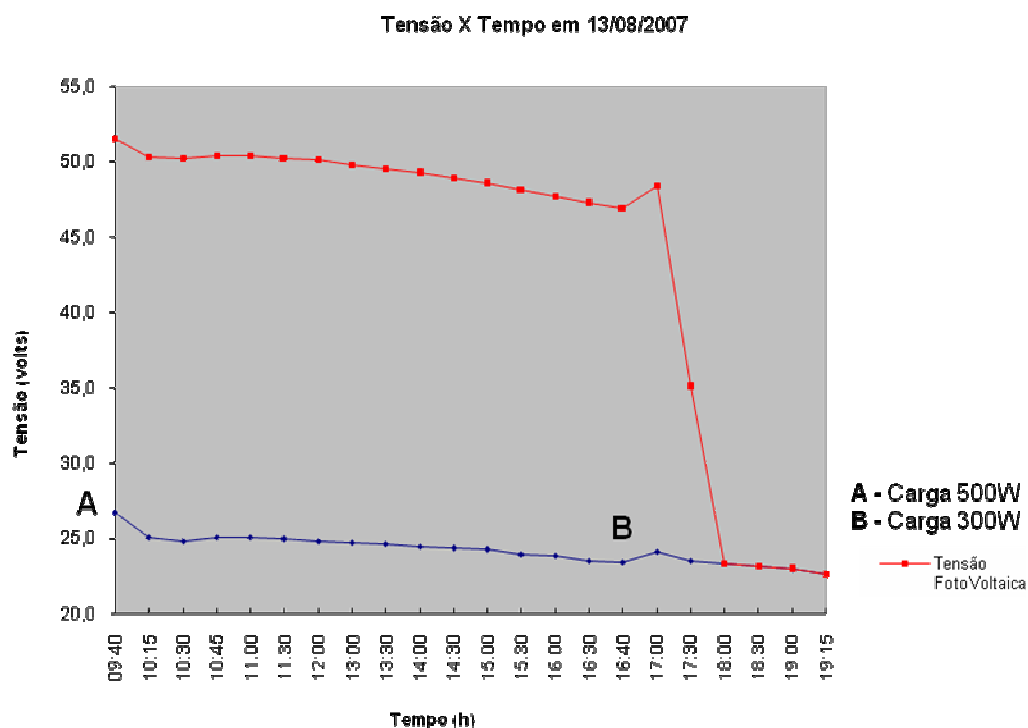


Figura 49 - Monitoramento das tensões no dia 13/08/2007: nos módulos do painel fotovoltaico (T.M.A., T.M.B., T.M.C. T.M.D.); no sistema fotovoltaico (T.S.) e no banco de baterias (T.B.B.)

Observando a Figura 50, verifica-se que a energia fotovoltaica gerada no intervalo das 9h00min às 14h30min (Tabela D3) foi de 740,45 Wh, correspondendo a 57,4% da energia utilizada pela carga, concluindo-se que os outros 42,6% são provenientes da energia acumulada no banco de baterias. A energia utilizada pela carga foi de 1290 Wh.

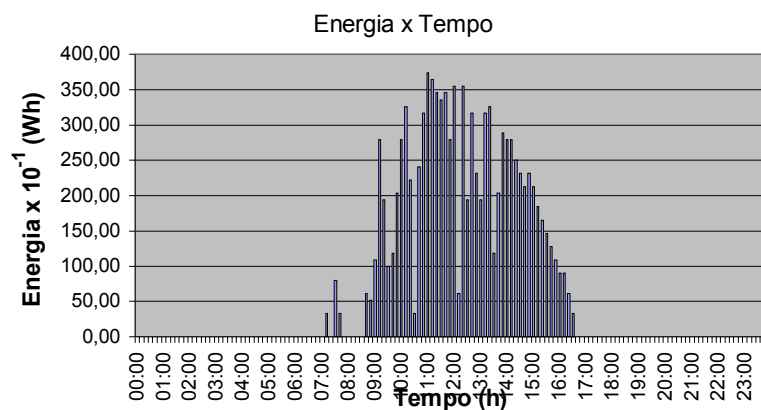


Figura 50: Energia Solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 14/08/2007

Tensão X Tempo em 14-08-2007

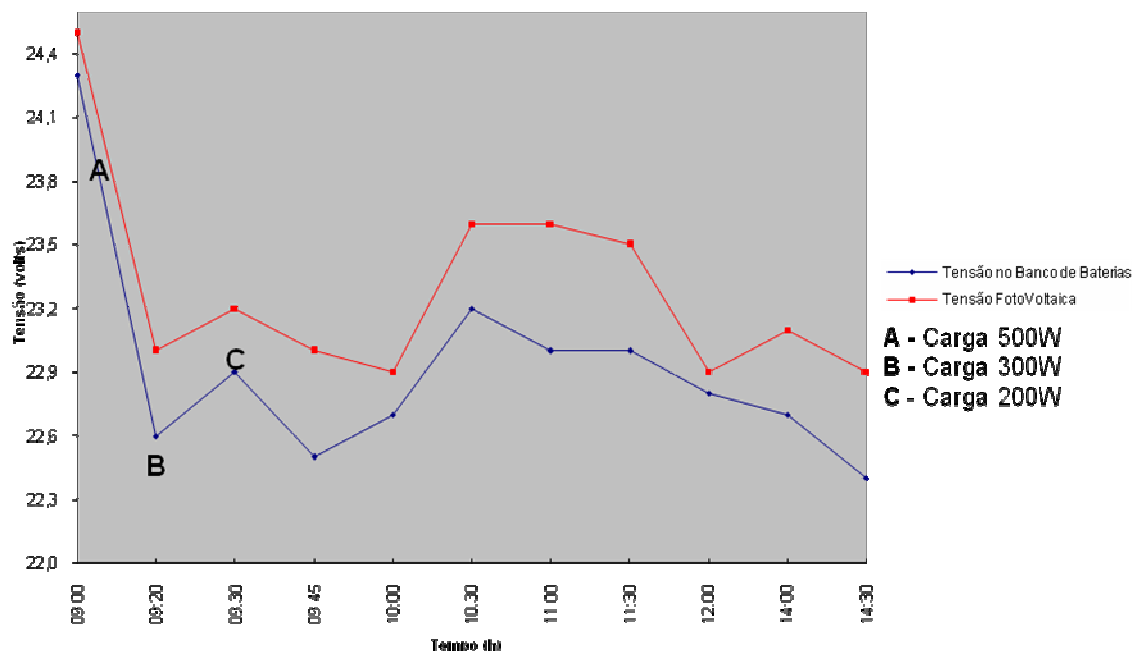


Figura 51 - Monitoramento das tensões no dia 14/08/2007: nos módulos do painel fotovoltaico (T.M.A., T.M.B., T.M.C. T.M.D.); no sistema fotovoltaico (T.S.) e no banco de baterias (T.B.B.)

No dia 14/08/07, como pode ser constatado na Figura 51, às 09h00min foi conectada uma carga de 500 W que às 09h20min, devido a queda de tensão do Banco de Baterias, foi reduzida para 300W. Como a tensão continuou caindo, às 09h30min esta carga teve que ser reduzida para 200W se mantendo até às 14h30min, quando devido ao baixo nível de tensão do Banco de Baterias foi desconectada do sistema.

Pode-se verificar, na Figura 52 e na Tabela D4, que a energia eólica gerada no intervalo das 9h00min às 15h00min é de 672,72 Wh, correspondendo a 41,2% da energia gerada pelo sistema híbrido.

A energia fotovoltaica (Figura 53), gerada neste mesmo intervalo foi de 960,11Wh, correspondendo aos outros 58,8% da energia total gerada no intervalo.

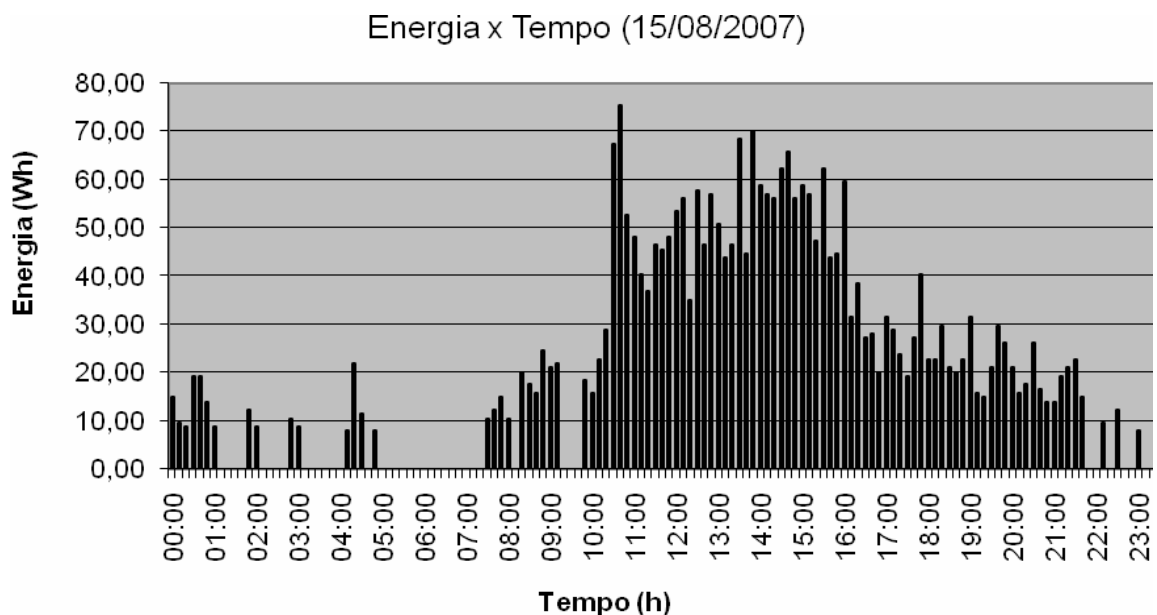


Figura 52 - Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 15/08/2007

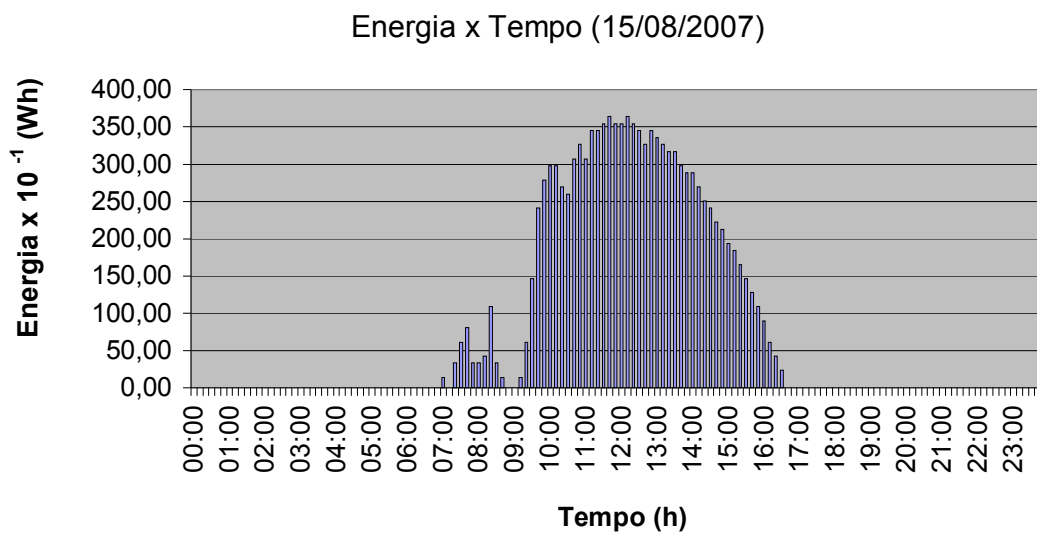


Figura 53 - Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 15/08/2007

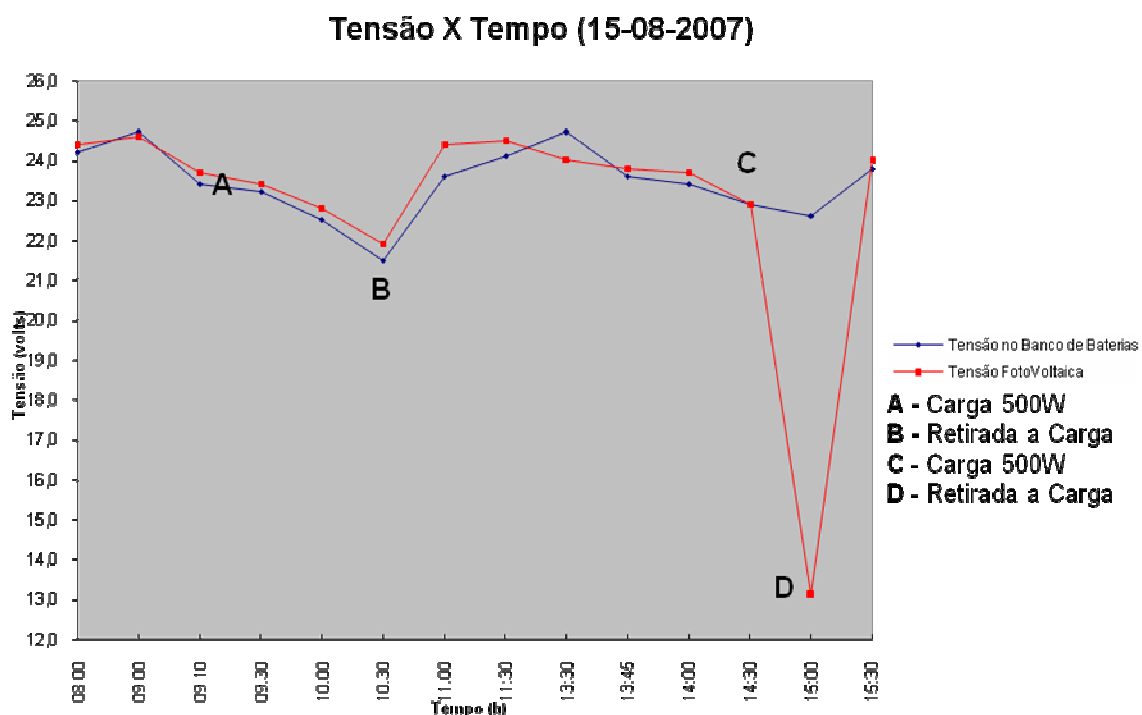


Figura 54 - Monitoramento das tensões no dia 15/08/2007: nos módulos do painel fotovoltaico (T.M.A., T.M.B., T.M.C. T.M.D.); no sistema fotovoltaico (T.S.) e no banco de baterias (T.B.B.)

No dia 15/08/2007 (Fig.54) foi colocado em funcionamento o sistema híbrido (geração híbrida, eólica e solar fotovoltaica). Às 9h00min foi conectada ao sistema uma carga resistiva de 500 W provocando uma redução gradativa na tensão do Banco de Baterias sendo necessária a retirada da carga às 10h30min. Para que houvesse uma recuperação da tensão no Banco de Baterias a carga de 500 W foi reconectada somente às 13h30min sendo mantida até às 15h00min onde novamente foi retirada em função da baixa tensão apresentada pelo BB. A energia utilizada pela carga no intervalo mencionado anteriormente foi de 1,7 kWh.

Conforme pode se verificar na Figura 55, no dia 16/08/07 às 09h00min foi conectado ao sistema uma carga de 500 W provocando uma acentuada queda de tensão no BB o que levou a retirada da carga às 10:15h. Sendo que às 11h00min foi recolocada uma carga de 200 W e que novamente foi retirada às 11h30min. Às 13h30min foi reconectada a carga de 200 W que se manteve até as 17h00min gerando no dia um total de 1,65 kWh de energia utilizada pela carga.

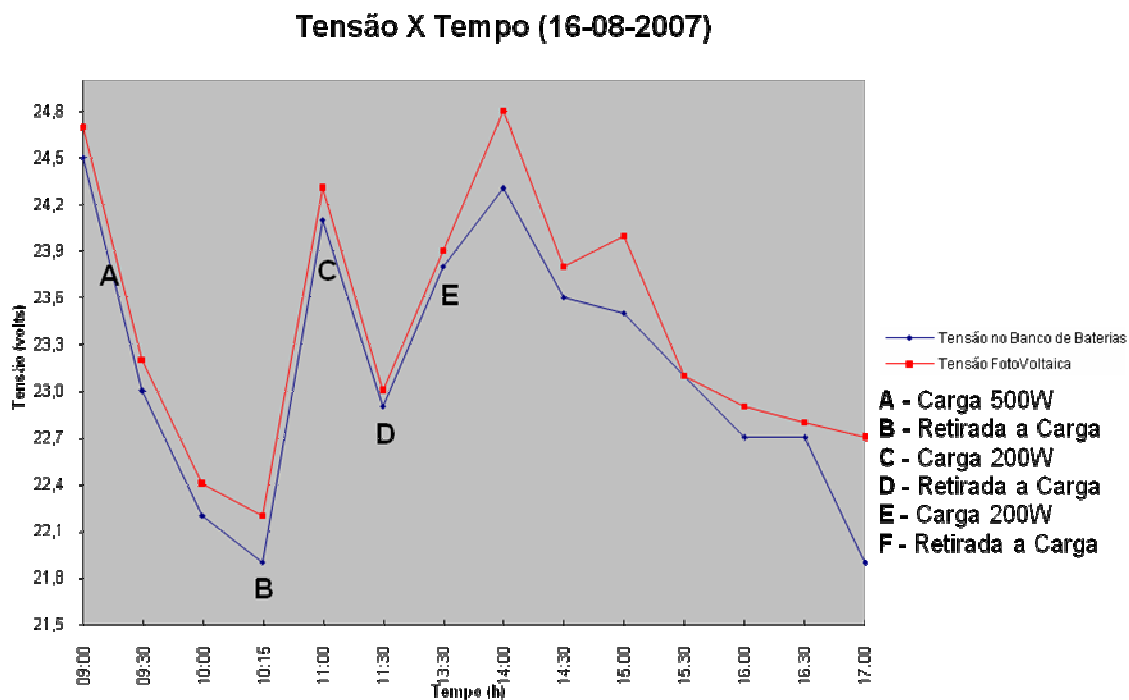


Figura 55 - Monitoramento das tensões no dia 16/08/2007: nos módulos do painel fotovoltaico (T.M.A., T.M.B., T.M.C. T.M.D.); no sistema fotovoltaico (T.S.) e no banco de baterias (T.B.B.)

Na Figura 56 e Tabela D6, constata-se que a energia eólica gerada, no intervalo das 09h00min às 17h00min, foi de 737,11Wh, equivalendo a 44,7 % da energia consumida na carga.

Analisando a Figura 57 e tabela D7, verifica-se que a energia fotovoltaica, gerada no intervalo da 9h00min às 17h00min do 16/08/07, é de 422,76 Wh, o que corresponde a 25,6% da energia consumida na carga. Pode-se concluir que os outros 29,7% da energia utilizada pela carga são provenientes do banco de baterias que pode ser confirmado pela Figura 55 devido à queda de tensão medida no citado banco.

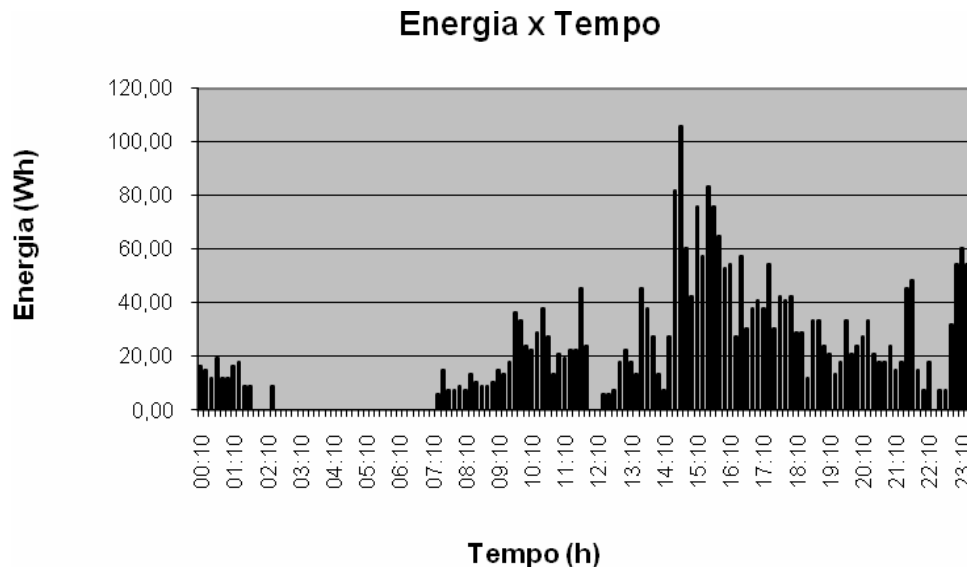


Figura 56 – Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 16/08/2007

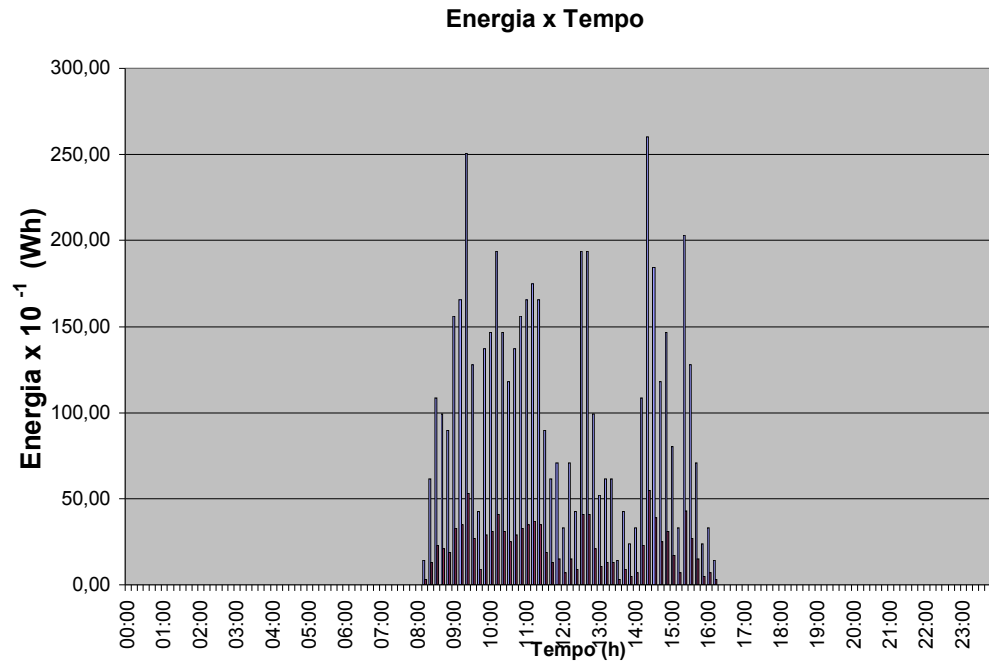


Figura 57 - Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 16/08/2007

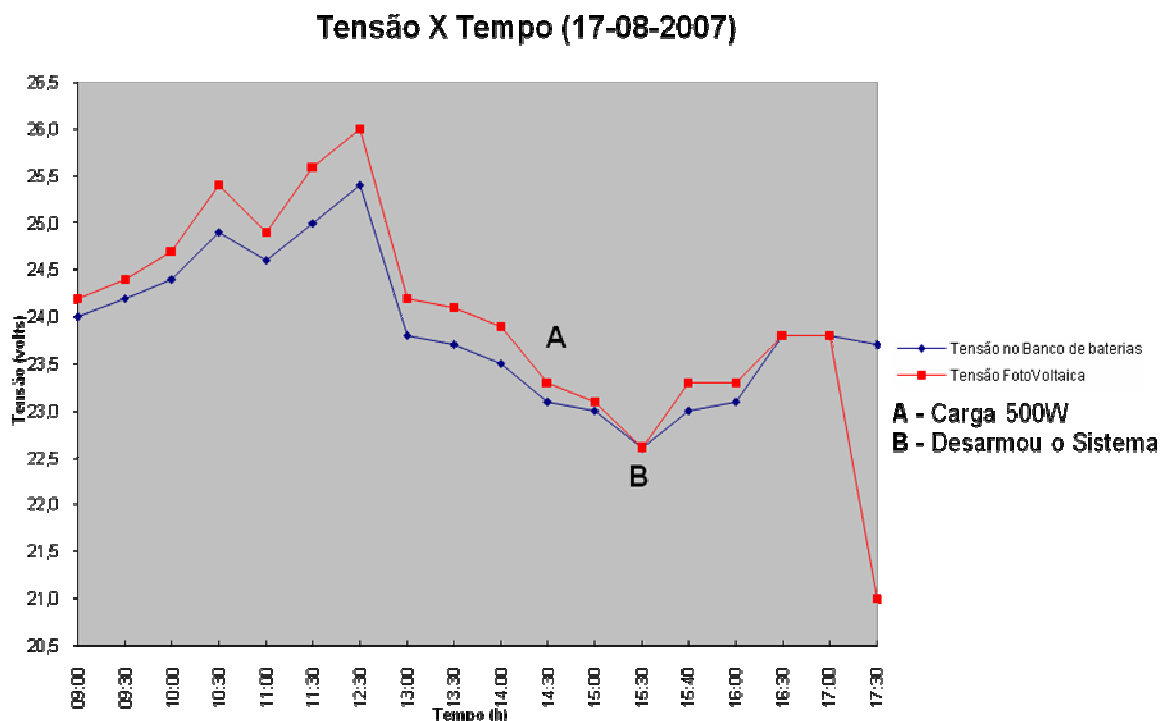


Figura 58 - Monitoramento das tensões no dia 17/08/2007: nos módulos do painel fotovoltaico (T.M.A., T.M.B., T.M.C. T.M.D.); no sistema fotovoltaico (T.S.) e no banco de baterias (T.B.B.)

No dia 17/08/07 (Fig.58) devido às condições desfavoráveis de chuva e pouco vento somente às 12h30min, como pode ser verificado na Figura 58, foi colocada uma carga de 500W que se manteve até às 15:30h quando desarmou o sistema porque a tensão do BB atingiu o valor programado para controlador de carga desconectar o sistema. A energia utilizada pela carga no intervalo mencionado foi de 1,75 kWh.

Observando a Figura 59, constata-se que a energia eólica gerada no intervalo de carga (12h30min às 15h00min) foi de 683,99Wh, correspondendo a 39% da energia utilizada na carga.

Na Figura 60, verifica-se que a energia fotovoltaica gerada corresponde a 20,9%.

Os outros 40,1% utilizados pela carga foi proveniente do banco de baterias, o que explica a queda de tensão desse banco (Fig. 61).

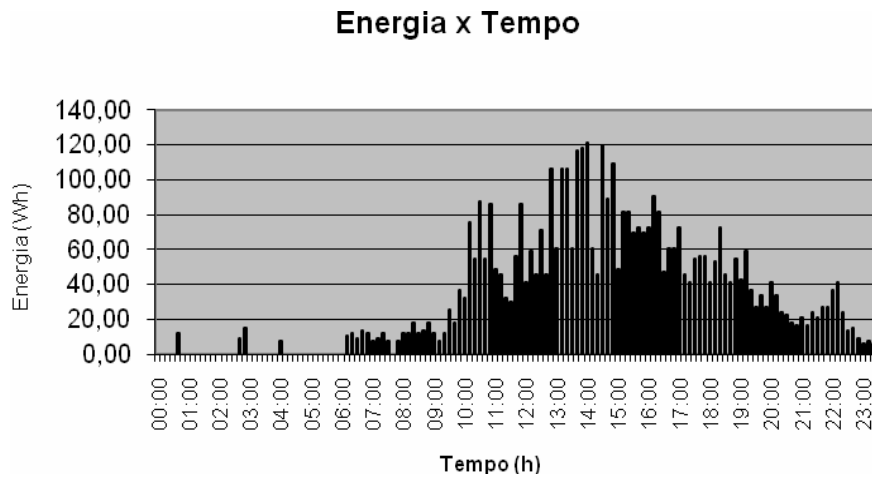


Figura 59 – Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 17/08/2007

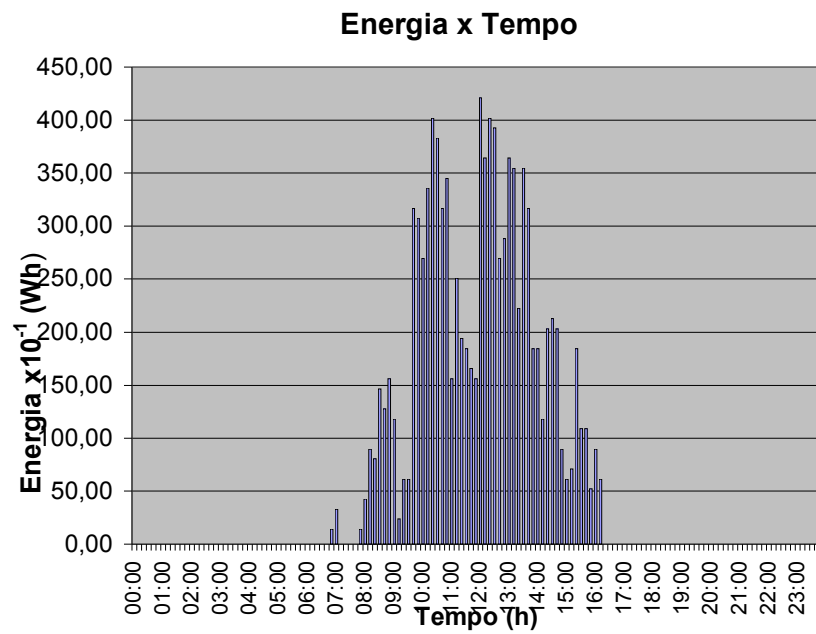


Figura 60 – Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos) no dia 17/08/2007

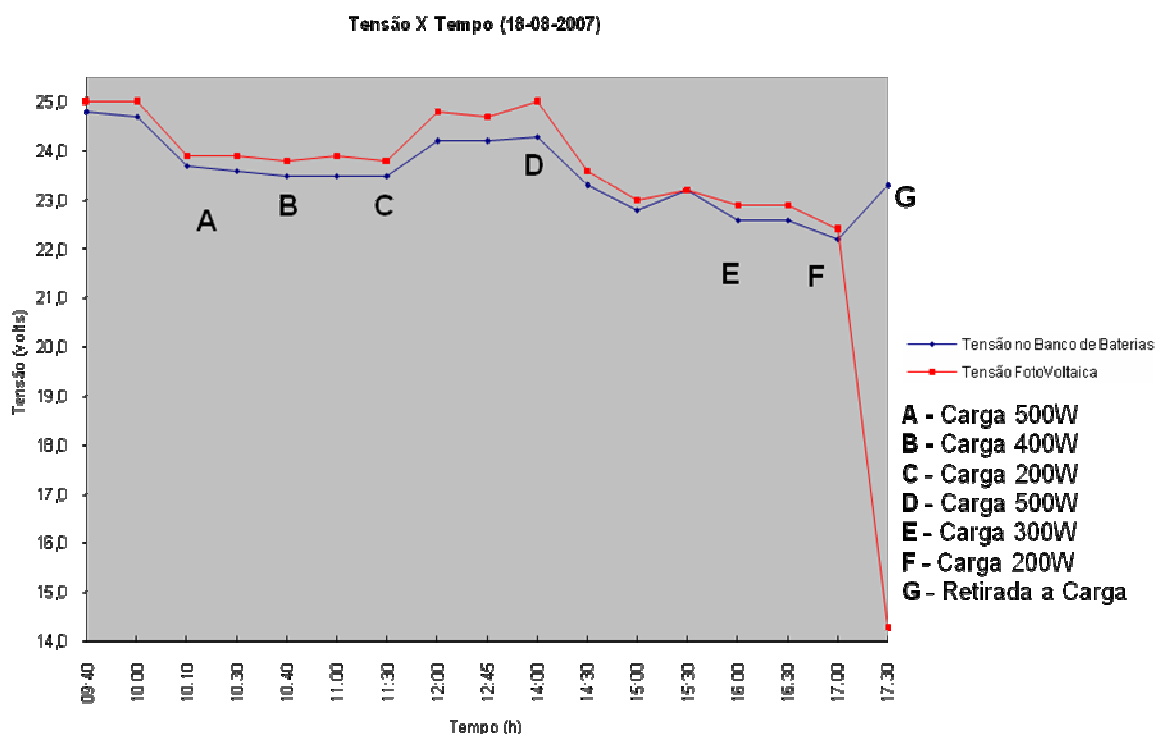


Figura 61 - Monitoramento das tensões no dia 18/08/2007: nos módulos do painel fotovoltaico (T.M.A., T.M.B., T.M.C. T.M.D.); no sistema fotovoltaico (T.S.) e no banco de baterias (T.B.B.)

Verifica-se, pelo gráfico da Figura 62 e Tabela D10 que a energia eólica gerada é de 1255,78 Wh, no intervalo das 10h00min às 17h00min, correspondendo a 53,4% da energia utilizada pela carga. Pelo gráfico da Figura 63 e Tabela D11, observa-se que a energia fotovoltaica gerada foi de 1005,61 Wh que corresponde a 42,8% da energia utilizada pela carga. Os outros 3,8 % de energia utilizada pela carga foram retirados do banco de baterias.

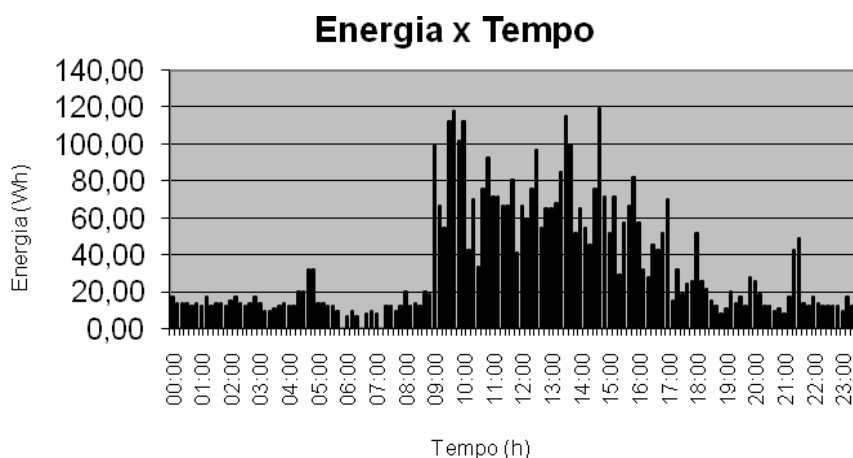


Figura 62 – Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 18/08/2007

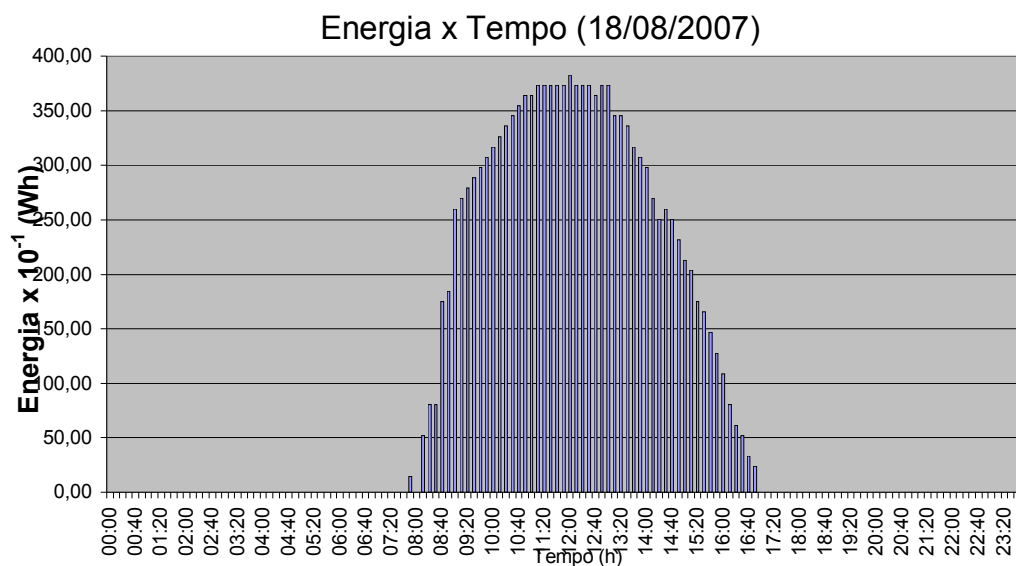


Figura 63 – Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 18/08/2007

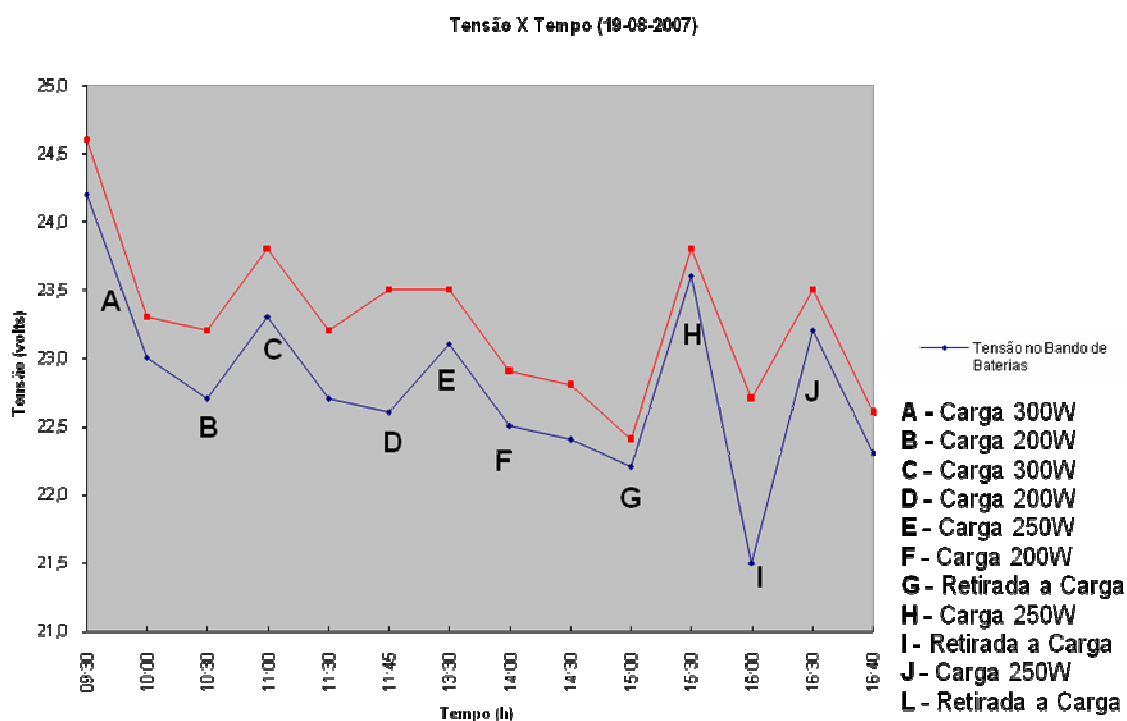


Figura 64 - Monitoramento das tensões no dia 19/08/2007: nos módulos do painel fotovoltaico (T.M.A., T.M.B., T.M.C. T.M.D.); no sistema fotovoltaico (T.S) e no banco de baterias (T.B.B)

Analisando o gráfico da Figura 65 e Tabela D12, constata-se que a energia eólica gerada no intervalo das 9h30min às 16h40min foi de 475,66Wh, equivalendo a 31,7% da energia utilizada na carga.

Nos dias 18 e 19 como pode ser confirmado através dos gráficos das Figuras 61 e 64, apesar de ter sido feito ajustes na carga utilizada, não foi possível gerar energia utilizável na carga acima de 2,35 kWh. A baixa disponibilidade atribui-se às condições desfavoráveis no regime de vento e da radiação solar incidente nesse dia.

Pelo gráfico da Figura 66 e Tabela D13, verifica-se que a energia fotovoltaica gerada foi de 68,2% no intervalo referido acima. Os outros 0,1% utilizados pela carga atribui-se ao banco de baterias.

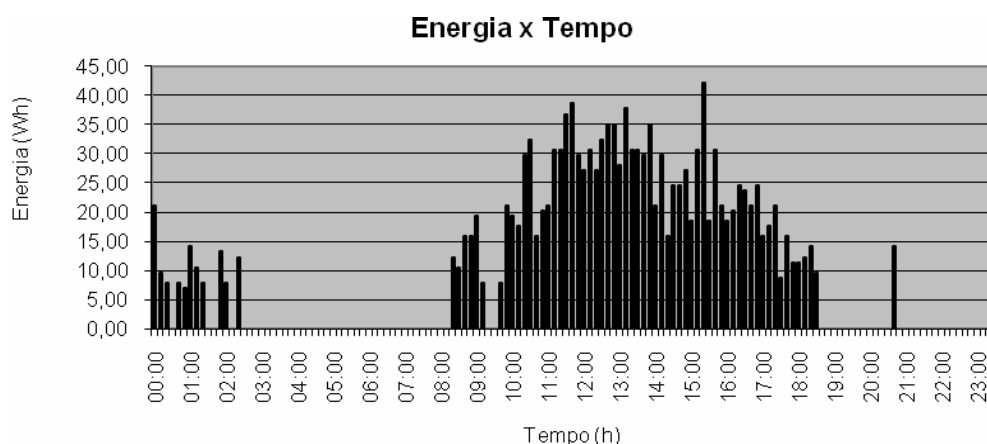


Figura 65 – Energia eólica, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 19/08/2007

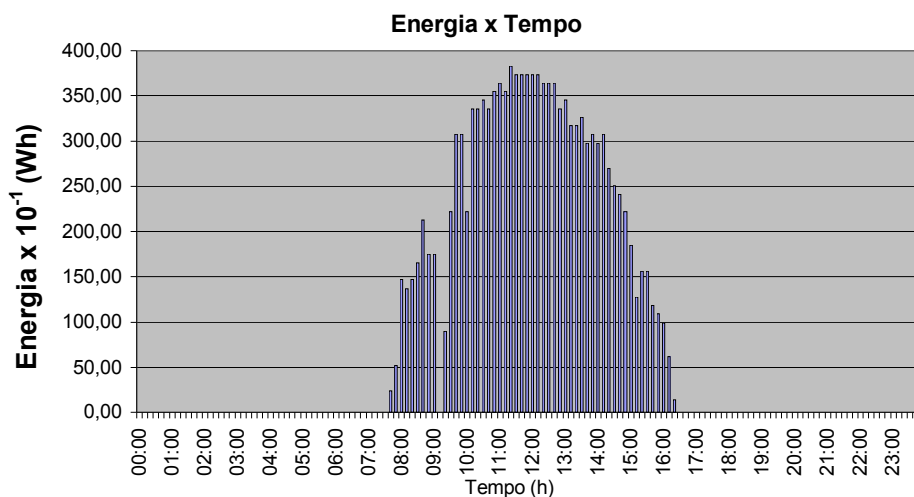


Figura 66 - Energia solar, em cada intervalo de tempo (10 minutos), no dia 19/08/2007

A seguir, nas Tabelas 8 e 9 e nas Figuras 67 e 68, são apresentados resultados referentes a energia eólica e a energia solar geradas, diariamente, no período de 13/08/07 a 19/08/07.

Tabela 8 – Energia gerada diariamente

Data (agosto)	Eólico	Solar
13		958,04
14		740,45
15	672,72	960,11
16	737,11	422,76
17	683,99	366,09
18	1255,78	1005,61
19	475,66	1022,57

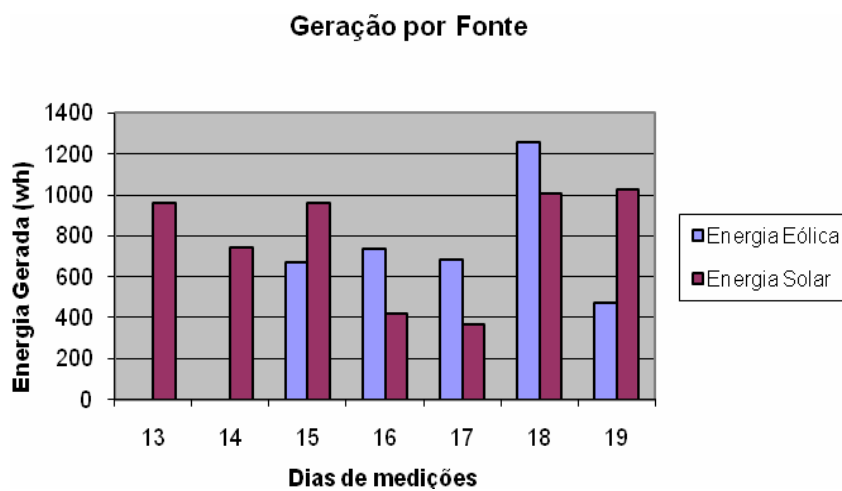


Figura 67 – Energia gerada (Wh) no período de 13/08 a 19/08/07.

Tabela 9 – Percentual de energia gerada diariamente

Data (agosto)	Eólico	Solar
13		22,20%
14		57,40%
15	41,20%	58,80%
16	44,70%	25,60%
17	39%	20,90%

18	53,40%	42,80%
19	31,70%	68,20%

Aporte das Fontes

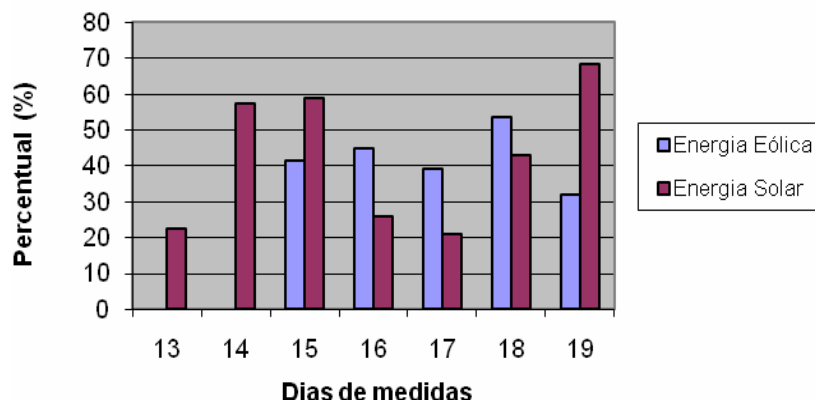


Figura 68 – Percentual (%) de energia gerada por fonte no período de 13/08 a 19/08/07

6 CONCLUSÃO

A polêmica premência de substituição das alternativas tradicionais de geração de energia por tecnologias com base em fontes renováveis e a sempre crescente demanda energética balizaram o escopo desta dissertação, que propõe um sistema experimental em que as conclusões mais relevantes são as seguintes:

Constatou-se que em dias que a velocidade média do vento é inferior a 04 m/s a energia eólica gerada não é suficiente para ser convertida em energia elétrica, com os equipamentos utilizados pela pesquisa.

Embora não constituísse objetivo deste trabalho determinar a curva de potência do aerogerador, constatou-se que a curva de potência fornecida pelo fabricante não era adequada para o local dos experimentos.

Ficou comprovado que, conectada a carga à bateria, há uma queda de tensão na primeira meia hora de medição, variável entre 0,5 e 1,5 volts, a depender das variáveis: grandeza da carga conectada (200 W a 500 W), aporte de energia eólica (470 Wh a 1.260 Wh) e aporte energia solar (360 W a 1030 W). Quanto maior a carga conectada, maior a queda de tensão. Durante os sete dias medidos (8 horas por dia) a média percentual de energia solar foi de 42,27%; e de energia eólica, de 42%. O que significa dizer que o percentual restante foi gerado no intervalo não monitorado por esta pesquisa.

Conclui-se, portanto, que o sistema híbrido de pequeno porte proposto é tecnicamente viável, pois, durante os estudos, foram gerados 12,88 kWh, tendo uma média diária de 1,84 kWh, para um período estudado de 8 horas – com uma média horária de 0,23 kWh.

Conclui-se ainda que, para as condições de velocidade de vento e radiação solar pesquisadas no laboratório da UFRN, onde foram feitos os experimentos, e para as condições dos equipamentos acima descritos nesta pesquisa, pode-se dispor de energia para uma carga resistiva de 230 W, para um período de 8 horas.

Como sugestões para trabalhos futuros e/ou complementares, colocamos:

- Monitorar corrente e tensão para ambos os sistemas (solar/eólico) e a descarga das baterias);
- Determinar a curva de potência do aerogerador e do painel fotovoltaico para as condições do LABDTE;
- Determinar a curva de potência para o sistema híbrido instalado no LABDTE.

REFERÊNCIAS

ALDABÓ, Ricardo. **Energia Eólica**. São Paulo: Artliber, 2002. 156p.

CALLISTER JR., William D.. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CABRERIZO, 1987. Instalaciones solares fotovoltaicas. PROGNSA. Sevilla, España. In: GARCIA, Felipe Hernández. **Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2004. 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

CIEMAT,2000. Fundamentos, Dimensionamento y Aplicaciones de la Energia Solar Fotovoltaica. Editorial CIEMAT, Madrid, España. In: GARCIA, Felipe Hernández. **Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2004. 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

CEPEL/CRESESB. Disponível em: <<http://www.cepel.br/crese/cresebs.htm>> Acesso em: 22 out. 2006.

DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION (DWIA), 2002. Disponível em: <<http://www.windpower.dk>> Acesso em: 29 nov.2006.

FARIAS, GISELE MARINS CHIARADA MENDES. **Sistemas híbridos eólicos/solar para aplicações isoladas análise experimental**. Recife, 2000. 105p. Pernambuco: UFP Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco.

GARCIA, Felipe Hernández. **Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2004. 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (Version 16). Progress in Photovoltaics: **Research and Applications**, n.8, p.377-84, 2000.

HIROO HIRATA, Miguel; ARAÚJO, Maria Regina O. P. **Introdução ao aproveitamento de energia eólica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2000.

KREITH, F. **Transmission del calor por radiacion**. Compañia Editora Continental, 1965.

LORENZO, E. **Eletricidade solar**: Ingenieria de los sistemas fotovoltaicos. Espanha: Artes Gráficas Galas, 1994. 338p.

MANWELL, J.F; MCGOWAN, JG; ROGERS, A.L. **Wind Energy Explained**: Theory, Design and Application. England: John Wiley & Sons, 2003. 577p.

OLIVEIRA, S. H. F. de. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos**: Ênfase na eletrificação de residências de baixo consumo. São Paulo: USP. 240p. Dissertação (Mestrado em energia). PIPGE/Universidade de São Paulo. 1997.

PALZ, Wolfgang. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 1995, 358p.

SIQUEIRA, Jair Antônio Cruz, **Desempenho de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. Botucatu SP, 2005. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, E.M.S. **Instalação de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água**. Recife: Editora Universitária, 1998.

TOMALSQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003, 515p.

APÊNDICES

Apêndice A – PAINEL SOLAR SOB SOMBRA DO POSTE

Painel solar ampliado para melhor visualização do efeito de sombreamento.



Figura A1 - Sombra da torre sobre dois módulos.

Apêndice C - MONITORAMENTO DA TENSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO.

Tabela C1 – Monitoramento das tensões (V) no dia 03/07/07

03/07								
	Tens S	T P A	T P B	T P C	T P D	T B	T B B	T C E
5:00	0,6	0,3				12,2	24,4	
5:15	5,0	2,0	1,8					
5:30	20,2	10,8	10,5	10,6	10,3	12,2	24,5	
5:45	26,4	13,1	12,8	12,8	12,6	12,2	24,5	
6:00	24,8	12,5	12,0	12,7	12,2	12,2	24,5	
9:30	26,5	15,4	18,7	8,1**	10,6**	12,9	25,9	26,5
10:00	25,5	10,4**	13,7	15,2	15,3	12,5	25,1	25,8
10:30	25,7	11,6****	14,4	11,4****	14,4	12,5	25,2	25,4
11:00	25,8	11,6****	11,2***	15,4	13,4	12,5	25,3	25,4
11:30	25,4	13,2	14,6	11,9	13,7	12,6	25,2	25,8
12:00	24,5	11,3	14,4	10,8	13,7	12,0	23,8	24,3
obs	11:35	util	750w		37,55k		12:00	37,9kWh
13:00	25,1	14,7	12,8	12,8	10,9	12,3	24,7	25,0
13:30	24,7	13,0	12,6	12,3	11,4	12,1	24,4	24,8
14:00	24,3	14,0	13,1	11,7	10,8	11,9	23,9	24,4
14:30	24,0	14,0	13,1	10,7	10,0	11,8	23,6	23,8
15:00	23,6	14,2	14,0	9,8	9,0	11,6	23,3	23,8
15:30	23,2	8,0***	7,3***	12,3***	15,0	11,5	22,9	23,8
								39,8kWh
16:00	24,7	15,2	14,9	9,7	9,4	12,2	24,4	25,1
16:30	24,5	14,9	14,6	9,8	9,7	12,2	24,4	24,7

Tabela C2 – Monitoramento das tensões (V) no dia 28/07/07

28/06	Tens S	T P A	T P B	T P C	T P D	T B	T B B	T C E
09:00	26,1	18,1	18,0	9,9	8,3	12,9	25,9	26,2
09:30	25,8	13,5	14,4	10,4	11,9	12,7	24,8	25,1
10:00	25,1	14,0	13,6	13,0	12,7	12,4	25,0	25,3
10:30	25,4	12,9	12,1	13,4	12,4	12,4	24,9	25,1
11:00	25,6	13,9	11,8	14,7	12,6	12,4	25,3	25,0
11:30	25,1	14,4	14,2	11,8	13,2	12,3	24,8	25,0
12:00	24,9	13,4	12,2	13,3	13,1	12,3	24,6	24,9
13:00	25,4	13,9	12,7	12,9	11,7	12,4	25,0	25,3
13:30	25,1	13,9	12,8	13,6	11,8	12,4	25,0	25,5
14:00	24,7	13,1	11,8	13,1	11,8	12,3	24,6	24,8
14:30	25,4	14,0	12,9	12,7	11,6	12,5	25,1	25,6
15:00	24,7	13,7	12,7	12,1	11,1	12,3	24,5	24,8
15:30	24,7	13,2	12,2	12,5	11,5	12,2	24,5	24,8
16:00	24,6	12,8	12,1	12,4	11,8	12,2	24,4	24,7
16:30	24,5	12,7	12,0	12,4	11,8	12,2	24,4	24,7
17:00	24,7	12,8*	12,7*	12,7*	12,4*	12,1	24,2	24,4
17:30	6,8	3,4	3,0	2,5	2,1	12,1	24,2	24,6
18:00	0,5	0	0	0	0	12,0	24,2	24,5

Obs.: 31,3kWh

Tabela C3 – Monitoramento das tensões (V) no dia 29/06/07

29/06	Tens S	T P A	T P B	T P C	T P D	T B	T B B	T C E
9:00	25,0	17,4	19,0	6,1**	7,8**	12,4	24,8	25,0
09:30	24,8	16,0	18,5	6,2**	9,2**	12,2	24,6	24,8
10:00	25,2	10,9****	15,3	13,7	14,9	12,3	24,8	25,1
10:30	25,5	11,7	14,5	11,9	14,5	12,6	25,2	25,4
11:00	26,8	14,2	11,5	14,7	12,0	12,5	25,2	25,8
11:30	25,9	12,8	14,6	11,8	13,8	12,6	25,4	25,6
12:00	25,6	12,1	14,5	11,7	13,7	12,6	25,2	25,4
14:30	25,5	14,6	14,0	11,9	11,4	12,6	25,4	25,7
15:00	25,3	14,9	14,3	11,3	10,7	12,4	24,9	25,1
15:30	24,8	12,3***	17,8	7,1***	16,8	12,3	24,7	25,3
16:00	24,4	17,3	15,0	9,9***	7,8***	12,3	24,7	25,4
16:30	24,6	15,0	14,8	9,8	9,6	12,2	24,4	24,8
17:00	24,7	13,3	13,7	11,0	11,3	12,1	24,3	24,6
34,37 kWh								

Obs.: 33,0kWh

Tabela C4 – Monitoramento das tensões (V) no dia 28/06/07 (sistema híbrido conectado)

31,3 km	31,3kWh 28/06/2007							
	Tens S	T P A	T P B	T P C	T P D	T B	T B B	T C E
09:00	26,1	18,1	18,0	9,9	8,3	12,9	25,9	26,2
09:30	25,8	13,5	14,4	10,4	11,9	12,7	24,8	25,1
10:00	25,1	14,0	13,6	13,0	12,7	12,4	25,0	25,3
10:30	25,4	12,9	12,1	13,4	12,4	12,4	24,9	25,1
11:00	25,6	13,9	11,8	14,7	12,6	12,4	25,3	25,0
11:30	25,1	14,4	14,2	11,8	13,2	12,3	24,8	25,0
12:00	24,9	13,4	12,2	13,3	13,1	12,3	24,6	24,9
13:00	25,4	13,9	12,7	12,9	11,7	12,4	25,0	25,3
13:30	25,1	13,9	12,8	13,6	11,8	12,4	25,0	25,5
14:00	24,7	13,1	11,8	13,1	11,8	12,3	24,6	24,8
14:30	25,4	14,0	12,9	12,7	11,6	12,5	25,1	25,6
15:00	24,7	13,7	12,7	12,1	11,1	12,3	24,5	24,8
15:30	24,7	13,2	12,2	12,5	11,5	12,2	24,5	24,8
16:00	24,6	12,8	12,1	12,4	11,8	12,2	24,4	24,7
16:30	24,5	12,7	12,0	12,4	11,8	12,2	24,4	24,7
17:00	24,7	12,8*	12,7*	12,7*	12,4*	12,1	24,2	24,4
17:30	6,8	3,4	3,0	2,5	2,1	12,1	24,2	24,6
18:00	0,5	0	0	0	0	12,0	24,2	24,5

Tabela C5 – Monitoramento das tensões (V) no dia 03/07/07

03/07/2007								
	Tens S	T P A	T P B	T P C	T P D	T B	TBB	T C E
5:00	0,6	0,3				12,2	24,4	
5:15	5,0	2,0	1,8					
5:30	20,2	10,8	10,5	10,6	10,3	12,2	24,5	
5:45	26,4	13,1	12,8	12,8	12,6	12,2	24,5	
6:00	24,8	12,5	12,0	12,7	12,2	12,2	24,5	
	37,07kWh							
9:30	26,5	15,4	18,7	8,1**	10,6**	12,9	25,9	26,5
10:00	25,5	10,4**	13,7	15,2	15,3	12,5	25,1	25,8
10:30	25,7	11,6*** *	14,4	11,4****	14,4	12,5	25,2	25,4
11:00	25,8	11,6*** *	11,2***	15,4	13,4	12,5	25,3	25,4
11:30	25,4	13,2	14,6	11,9	13,7	12,6	25,2	25,8
12:00	24,5	11,3	14,4	10,8	13,7	12,0	23,8	24,3
obs	11:35	util	750W		37,55kW		12:00	37,9kWh
13:00	25,1	14,7	12,8	12,8	10,9	12,3	24,7	25,0
13:30	24,7	13,0	12,6	12,3	11,4	12,1	24,4	24,8
14:00	24,3	14,0	13,1	11,7	10,8	11,9	23,9	24,4
14:30	24,0	14,0	13,1	10,7	10,0	11,8	23,6	23,8
15:00	23,6	14,2	14,0	9,8	9,0	11,6	23,3	23,8
15:30	23,2	8,0***	7,3***	12,3***	15,0	11,5	22,9	23,8
								39,8kWh
16:00	24,7	15,2	14,9	9,7	9,4	12,2	24,4	25,1
16:30	24,5	14,9	14,6	9,8	9,7	12,2	24,4	24,7

Tabela C6– Tensão do Banco de Baterias e Tensão gerada pelo painel fotovoltaico (V) em 13/08/07

13/08/2007			
Hora	Tens Banco Baterias	Tens BB- Multímetro	Tens FV Gerada(mult)
09:40	27,0	26,7 (40,25kWh)	24,8 Carga 500W
10:15	25,3	25,0	25,3
10:30	25,4	24,8	25,4
10:45	25,2	25,0	25,4
11:00	25,3	25,0	25,4
11:30	25,2	24,9	25,3
12:00	25,2	24,8	25,3
13:00	25,0	24,7	25,1
13:30	24,9	24,6	24,9
14:00	24,8	24,4	24,8
14:30	24,5	24,3	24,6
15:00	24,5	24,2	24,3
15:30	24,3	23,9	24,2
16:00	24,0	23,8	23,9
16:30	23,8	23,5	23,7
16:40	23,6	23,4	23,5
		(43,9kWh)	Carga 300W
17:00	24,4	24,1	24,3
17:30	23,7	23,5	11,5
18:00	23,6	23,3	
18:30	23,3	23,1	
19:00	23,2	22,9	
19:15	22,9	22,6 (44,57 kWh)	

Carga: 4,32 kWh

Tabela C7 – Tensão do Banco de Baterias e Tensão gerada pelo painel fotovoltaico (V) em 14/08/07

14/08/2007			
Hora	Tens Banco Baterias	Tens BB- Multímetro	Tens FV Gerada(mult)
		44,58kWh	Carga 500W
09:00	24,5	24,3	24,5
09:20	22,9	22,6	23,0
		44,75kWh	Carga 300 W
09:30	23,2	22,9	23,2
		44,85kWh	Carga 200W
09:45	22,8	22,5	23,0
10:00	23,0	22,7	22,9
10:30	23,4	23,2	23,6
11:00	23,3	23,0	23,6
11:30	23,3	23,0	23,5
12:00	23,2	22,8	22,9
14:00	22,8	22,7	23,1
14:30	22,6	22,4	22,9
		45,87 kWh	Só fotovoltaica

Carga: 1,29 kWh

Tabela C8 – Tensão do BB e Tensão gerada pelo painel fotovoltaico (V) em 15/08/07, geração híbrida.

15/08/2007			
Hora	Tens Banco Baterias	Tens BB- Multímetro	Tens FV Gerada(mult)
08:00	24,4	24,2	24,4
09:00	25,0	24,7	24,6
		46,3 kWh	Carga 500 W
09:10	24,0	23,4	23,7
09:30	23,5	23,2	23,4
10:00	22,8	22,5	22,8
10:30	21,9	21,5	21,9
		47,2 kWh	s/ carga
11:00	24,4	23,6	24,4
11:30	24,5	24,1	24,5
13:30	24,8	24,7	24,0
		47,2 kWh	Carga 500 W
13:45	24,1	23,6	23,8
14:00	24,0	23,4	23,7
14:30	23,5	22,9	22,9
15:00	22,9	22,6	13,1
		48,0 kWh	
15:30	24,1	23,8	24,0

Carga: 1,7 kWh

Tabela C9 – Tensão do BB e Tensão gerada pelo painel fotovoltaico (V) em 16/08/07, geração híbrida

16/08/2007			
Hora	Tens Banco Baterias	Tens BB- Multímetro	Tens FV Gerada(mult)
09:00	24,5	24,5	24,7
		48,0 kWh	Carga 500 W
09:30	-	23,0	23,2
10:00	-	22,2	22,4
10:15	-	21,9	22,2
		48,68 kWh	Ret a carga
11:00	-	24,1	24,3
		48,68 kWh	200 W
11:30	-	22,9	23,0
			Ret a carga
13:30	-	23,8	23,9
		48,83 kWh	Carga 200 W
14:00	-	24,3	24,8
14:30	-	23,6	23,8
15:00	-	23,5	24,0
15:30	-	23,1	23,1
16:00	-	22,7	22,9
16:30	-	22,7	22,8
17:00	-	21,9	22,7
		49,65 kWh	

Carga: 1,65 kWh

Tabela C 10 – Tensão do BB e Tensão gerada pelo painel fotovoltaico (V) em 17/08/07, geração híbrida

17/08/2007			
Hora	Tens Banco Baterias	Tens BB- Multímetro	Tens FV Gerada(mult)
09:00	-	24,0	24,2
09:30	-	24,2	24,4
10:00	-	24,4	24,7
10:30	-	24,9	25,4
11:00	-	24,6	24,9
11:30	-	25,0	25,6
12:30	-	25,4	26,0
		49,65 kWh	Carga 500 W
13:00	-	23,8	24,2
13:30	-	23,7	24,1
14:00	-	23,5	23,9
14:30	-	23,1	23,3
15:00	-	23,0	23,1
15:30	-	22,6	22,6
Desarmou o s			
15:40	-	23,0	23,3
		51,4 kWh	
16:00	-	23,1	23,3
16:30	-	23,8	23,8
17:00	-	23,8	23,8
17:30	-	23,7	21,0

Carga: 1,75 kWh

Tabela C 11 – Tensão do BB e Tensão gerada pelo painel fotovoltaico (V) em 18/08/07, geração híbrida

18/08/2007			
Hora	Tens Banco Baterias	Tens BB- Multímetro	Tens FV Gerada(mult)
09:40	-	24,8	25,0
10:00	-	24,7	25,0
		51,4 kWh	Carga- 500W
10:10	-	23,7	23,9
10:30	-	23,6	23,9
10:40	-	23,5	23,8
10:45	-		Carga- 400W
11:00	-	23,5	23,9
11:30	-	23,5	23,8
11:35	-		Carga-200W
12:00	-	24,2	24,8
12:45	-	24,2	24,7
14:00	-	24,3	25,0
			Carga- 500W
14:30	-	23,3	23,6
15:00	-	22,8	23,0
			Carga- 300W
15:30	-	23,2	23,2
16:00	-	22,6	22,9
16:10	-		Carga-200W
16:30	-	22,6	22,9
17:00	-	22,2	22,4
17:05			Retirado a carga
17:30	-	23,3	14,3
		53,75kWh	

Carga: 2,35 kWh

Tabela C 12 – Tensão do BB e Tensão gerada pelo painel fotovoltaico (V) em 19/08/07, geração híbrida

19/08/2007			
Hora	Tens Banco Baterias	Tens BB- Multímetro	Tens FV Gerada(mult)
09:30	-	24,2	24,6
		53,75kWh	Carga-300W
10:00	-	23,0	23,3
10:30	-	22,7	23,2
10:40	-		Carga-200W
11:00	-	23,3	23,8
			Carga-300W
11:30	-	22,7	23,2
11:45	-	22,6	23,5
			Carga- 200W
13:30	-	23,1	23,5
			Carga-250W
14:00	-	22,5	22,9
			Carga-200W
14:30	-	22,4	22,8
15:00	-	22,2	22,4
			Retirado a carga
15:30	-	23,6	23,8
			Carga-250W
16:00	-	21,5	22,7
			Retirado a carga
16:30	-	23,2	23,5
			Carga-250W
16:40	-	22,3	22,6
		55,25kWh	

Carga: 1,5 kWh

Tabela C 13 – Tensão do BB e Tensão gerada pelo aerogerador (V) em 23/08/07.

23/8/2007	
Hora	Tens BB com multímetro
09:00	27,8
10:00	27,3
10:30	28,5
11:00	28,5
	carga 500W
11:30	25,2
12:00	25
13:00	24,6
13:30	24,4
14:00	24,2
14:30	23,6
15:00	23,4
15:30	23,6
16:00	23,3
16:30	23
17:00	22,6

Apêndice D – ENERGIA GERADA PELAS FONTES EÓLICA E SOLAR, EM CADA DIA DE MEDIÇÃO.

Unidades: Radiação Solar x 11,17 (W/m²) ; Energia Solar (Wh)

Tabela D1 – Fonte solar.

13/8/2007		
R. SOLAR	E. SOLAR	HORA
51	21,10	09:40
59	24,41	09:50
63	26,06	10:00
63	26,06	10:10
57	23,58	10:20
55	22,75	10:30
65	26,89	10:40
69	28,54	10:50
65	26,89	11:00
73	30,20	11:10
73	30,20	11:20
75	31,02	11:30
77	31,85	11:40
75	31,02	11:50
75	31,02	12:00
77	31,85	12:10
75	31,02	12:20
73	30,20	12:30
69	28,54	12:40
73	30,20	12:50
71	29,37	13:00
69	28,54	13:10
67	27,72	13:20
67	27,72	13:30
63	26,06	13:40
61	25,23	13:50
61	25,23	14:00
57	23,58	14:10
53	21,92	14:20
51	21,10	14:30
47	19,44	14:40
45	18,61	14:50
41	16,96	15:00
39	16,13	15:10
35	14,48	15:20
31	12,82	15:30
27	11,17	15:40
23	9,51	15:50
19	7,86	16:00
13	5,38	16:10
9	3,72	16:20

5	2,07	16:30
	0,00	16:40
	0,00	16:50
	0,00	17:00
	0,00	17:10
	0,00	17:20
	0,00	17:30
	0,00	17:40
	0,00	17:50
	0,00	18:00
	0,00	18:10
	0,00	18:20
	0,00	18:30
	0,00	18:40
	0,00	18:50
	0,00	19:00
	0,00	19:10

Energia disponível no fio = 958,04Wh

Tabela D2 – Fonte Eólica.

14/08/2007		
VELC.	HORA	POT. CAL.
7,69	14:30	203,12
7,5	14:40	188,44
7,45	14:50	184,69
7,35	15:00	177,36
7,31	15:10	174,48
7,74	15:20	207,11
8,31	15:30	256,32
7,4	15:40	181,00
6,54	15:50	124,94
6,92	16:00	148,01
7,02	16:10	154,52
6,54	16:20	124,94
5,73	16:30	84,03
7,93	16:40	222,74
8,31	16:50	256,32
7,55	17:00	192,23

Energia Disponível no Aero Gerador= 524,93Wh

Tabela D2 – Fonte Solar.

14/8/2007		
R .SOLAR	E. SOLAR	HORA
49	20,27	14:30
45	18,61	14:40
49	20,27	14:50
45	18,61	15:00
39	16,13	15:10
35	14,48	15:20
31	12,82	15:30
27	11,17	15:40
23	9,51	15:50
19	7,86	16:00
19	7,86	16:10
13	5,38	16:20
7	2,90	16:30
1	0,41	16:40
1	0,41	16:50
1	0,41	17:00

Energia disponível no fio = 167,12Wh

Tabela D3 – Fonte Solar.

14/8/2007		
R .SOLAR	E. SOLAR	HORA
23	9,51	09:00
59	24,41	09:10
41	16,96	09:20
21	8,69	09:30
25	10,34	09:40
43	17,79	09:50
59	24,41	10:00
69	28,54	10:10
47	19,44	10:20
7	2,90	10:30
51	21,10	10:40
67	27,72	10:50
79	32,68	11:00
77	31,85	11:10
73	30,20	11:20
71	29,37	11:30
73	30,20	11:40
59	24,41	11:50
75	31,02	12:00
13	5,38	12:10
75	31,02	12:20
41	16,96	12:30
67	27,72	12:40
49	20,27	12:50
41	16,96	13:00
67	27,72	13:10
69	28,54	13:20
25	10,34	13:30
43	17,79	13:40
61	25,23	13:50
59	24,41	14:00
59	24,41	14:10
53	21,92	14:20
49	20,27	14:30

Energia disponível no fio = 740,45Wh

Tabela D4 – Fonte Eólica.

15/8/2007		
VELC.	HORA	POT. CAL.
4,68	09:00	45,78
3,72	09:10	22,99
0	09:20	0,00
0	09:30	0,00
0	09:40	0,00
4,44	09:50	39,10
4,2	10:00	33,09
4,87	10:10	51,59
5,35	10:20	68,40
6,97	10:30	151,25
7,26	10:40	170,92
6,49	10:50	122,10
6,25	11:00	109,05
5,92	11:10	92,67
5,73	11:20	84,03
6,16	11:30	104,41
6,11	11:40	101,88
6,25	11:50	109,05
6,54	12:00	124,94
6,59	12:10	127,83
5,68	12:20	81,85
6,69	12:30	133,74
6,16	12:40	104,41
6,64	12:50	130,76
6,45	13:00	119,86
5,97	13:10	95,04
6,16	13:20	104,41
7,02	13:30	154,52
6,02	13:40	97,45
7,07	13:50	157,85
6,73	14:00	136,15
6,64	14:10	130,76
6,59	14:20	127,83
6,88	14:30	145,46
6,92	14:40	148,01
6,59	14:50	127,83
6,73	15:00	136,15

Energia Disponível no Aero Gerador= 672,72Wh

Tabela D5 – Fonte Solar.

15/8/2007		
R .SOLAR	E. SOLAR	HORA
47	19,44	09:00
49	20,27	09:10
49	20,27	09:20
59	24,41	09:30
65	26,89	09:40
67	27,72	09:50
65	26,89	10:00
39	16,13	10:10
71	29,37	10:20
73	30,20	10:30
69	28,54	10:40
71	29,37	10:50
69	28,54	11:00
77	31,85	11:10
65	26,89	11:20
79	32,68	11:30
73	30,20	11:40
61	25,23	11:50
71	29,37	12:00
61	25,23	12:10
73	30,20	12:20
57	23,58	12:30
69	28,54	12:40
69	28,54	12:50
73	30,20	13:00
71	29,37	13:10
71	29,37	13:20
67	27,72	13:30
69	28,54	13:40
63	26,06	13:50
61	25,23	14:00
59	24,41	14:10
57	23,58	14:20
55	22,75	14:30
51	21,10	14:40
43	17,79	14:50
33	13,65	15:00

Energia disponível no fio = 960,11Wh

6,59	15:50	127,83
6,64	16:00	130,76

Tabela D6 – Fonte Eólica.

16/8/2007		
VELC.	HORA	POT. CAL.
4,29	09:00	35,27
4,01	09:10	28,80
4,49	09:20	40,43
5,82	09:30	88,05
5,68	09:40	81,85
5,11	09:50	59,60
4,96	10:00	54,50
5,49	10:10	73,91
5,87	10:20	90,34
5,35	10:30	68,40
4,06	10:40	29,89
4,87	10:50	51,59
5,59	11:00	78,02
4,96	11:10	54,50
4,96	11:20	54,50
6,21	11:30	106,97
5,11	11:40	59,60
3	11:50	12,06
1,81	12:00	2,65
3,05	12:10	12,67
3,05	12:20	12,67
3,48	12:30	18,82
4,49	12:40	40,43
5,01	12:50	56,17
4,53	13:00	41,52
4,2	13:10	33,09
6,3	13:20	111,69
5,92	13:30	92,67
5,3	13:40	66,50
3,91	13:50	26,70
3,48	14:00	18,82
5,35	14:10	68,40
7,55	14:20	192,23
8,02	14:30	230,41
6,92	14:40	148,01
6,11	14:50	101,88
7,45	15:00	184,69
6,88	15:10	145,46
7,64	15:20	199,19
7,35	15:30	177,36
7,16	15:40	163,95

5,39	16:10	69,94
6,88	16:20	145,46
5,59	16:30	78,02
5,82	16:40	88,05
6,02	16:50	97,45
5,92	17:00	92,67

Energia Disponível no Aero Gerador= 737,11Wh

Tabela D7 – Fonte Solar.

16/8/2007		
R .SOLAR	E. SOLAR	HORA
33	13,65	09:00
35	14,48	09:10
53	21,92	09:20
27	11,17	09:30
9	3,72	09:40
29	12,00	09:50
31	12,82	10:00
41	16,96	10:10
31	12,82	10:20
25	10,34	10:30
29	12,00	10:40
33	13,65	10:50
35	14,48	11:00
37	15,31	11:10
35	14,48	11:20
19	7,86	11:30
13	5,38	11:40
15	6,20	11:50
7	2,90	12:00
15	6,20	12:10
9	3,72	12:20
41	16,96	12:30
41	16,96	12:40
21	8,69	12:50
11	4,55	13:00
13	5,38	13:10
13	5,38	13:20
3	1,24	13:30
9	3,72	13:40
5	2,07	13:50
7	2,90	14:00
23	9,51	14:10
55	22,75	14:20
39	16,13	14:30
25	10,34	14:40
31	12,82	14:50
17	7,03	15:00
7	2,90	15:10
43	17,79	15:20
27	11,17	15:30
15	6,20	15:40
5	2,07	15:50
7	2,90	16:00

3	1,24	16:10
	0,00	16:20
	0,00	16:30
	0,00	16:40
	0,00	16:50
	0,00	17:00

Energia disponível no fio = 422,76Wh

Tabela D8 – Fonte Eólica.

17/8/2007		
VELC.	HORA	POT. CAL.
7,21	12:30	167,41
6,25	12:40	109,05
8,02	12:50	230,41
6,97	13:00	151,25
8,02	13:10	230,41
8,02	13:20	230,41
6,97	13:30	151,25
8,41	13:40	265,69
8,45	13:50	269,50
8,55	14:00	279,18
6,92	14:10	148,01
6,3	14:20	111,69
8,5	14:30	274,31
7,78	14:40	210,34
8,12	14:50	239,14
6,54	15:00	124,94
7,59	15:10	195,30
7,59	15:20	195,30
7,16	15:30	169,46

Energia Disponível no Aero Gerador= 683,99Wh

Tabela D9 – Fonte Solar.

17/8/2007		
R. SOLAR	E. SOLAR	HORA
83	34,33	12:30
57	23,58	12:40
61	25,23	12:50
77	31,85	13:00
75	31,02	13:10
47	19,44	13:20
75	31,02	13:30
67	27,72	13:40
39	16,13	13:50
39	16,13	14:00
25	10,34	14:10
43	17,79	14:20
45	18,61	14:30
43	17,79	14:40
19	7,86	14:50
13	5,38	15:00
15	6,20	15:10
39	16,13	15:20
23	9,51	15:30
	0,00	15:40

Energia disponível no fio = 366,09Wh

Tabela D10 – Fonte Eólica.

18/8/2007		
VELC.	HORA	POT. CAL.
8,22	10:00	248,08
6,11	10:10	101,88
7,31	10:20	174,48
5,63	10:30	79,71
7,55	10:40	192,23
7,74	10:50	207,11
7,4	11:00	181,00
7,35	11:10	177,36
7,26	11:20	170,92
7,31	11:30	174,48
7,64	11:40	199,19
6,16	11:50	104,41
7,31	12:00	174,48
6,92	12:10	148,01
7,5	12:20	188,44
7,93	12:30	222,74
6,73	12:40	136,15
7,16	12:50	163,95
7,12	13:00	161,22
7,21	13:10	167,41
7,78	13:20	210,34
8,5	13:30	274,31
7,88	13:40	218,56
6,59	13:50	127,83
7,12	14:00	161,22
6,73	14:10	136,15
6,3	14:20	111,69
7,5	14:30	188,44
8,74	14:40	298,21
7,35	14:50	177,36
6,54	15:00	124,94
7,4	15:10	181,00
5,44	15:20	71,91
6,88	15:30	145,46
7,21	15:40	167,41
7,64	15:50	199,19
6,88	16:00	145,46
5,73	16:10	84,03
5,39	16:20	69,94
6,3	16:30	111,69
6,06	16:40	99,40
6,64	16:50	130,76
5,68	17:00	81,85

Energia Disponível no Aero Gerador= 1255,78Wh

Tabela D11 – Fonte Solar.

18/8/2007		
R .SOLAR	E. SOLAR	HORA
67	27,72	10:00
69	28,54	10:10
71	29,37	10:20
73	30,20	10:30
75	31,02	10:40
77	31,85	10:50
77	31,85	11:00
79	32,68	11:10
79	32,68	11:20
79	32,68	11:30
79	32,68	11:40
79	32,68	11:50
81	33,51	12:00
79	32,68	12:10
79	32,68	12:20
79	32,68	12:30
77	31,85	12:40
79	32,68	12:50
79	32,68	13:00
73	30,20	13:10
73	30,20	13:20
71	29,37	13:30
67	27,72	13:40
65	26,89	13:50
63	26,06	14:00
57	23,58	14:10
53	21,92	14:20
55	22,75	14:30
53	21,92	14:40
49	20,27	14:50
45	18,61	15:00
43	17,79	15:10
37	15,31	15:20
35	14,48	15:30
31	12,82	15:40
27	11,17	15:50
23	9,51	16:00
17	7,03	16:10
13	5,38	16:20
11	4,55	16:30
7	2,90	16:40
5	2,07	16:50
1	0,41	17:00

Energia disponível no fio = 1005,61Wh

Tabela D12 – Fonte Eólica.

19/8/2007		
VELC.	HORA	POT. CAL.
3	09:30	12,06
3,96	09:40	27,74
4,72	09:50	46,97
4,53	10:00	41,52
4,39	10:10	37,79
5,39	10:20	69,94
5,59	10:30	78,02
4,25	10:40	34,29
3,91	10:50	26,70
4,68	11:00	45,78
5,35	11:10	68,40
5,35	11:20	68,40
5,73	11:30	84,03
5,82	11:40	88,05
5,39	11:50	69,94
5,35	12:00	68,40
5,44	12:10	71,91
5,2	12:20	62,80
5,63	12:30	79,71
5,68	12:40	81,85
5,68	12:50	81,85
5,25	13:00	64,63
5,73	13:10	84,03
5,35	13:20	68,40
5,49	13:30	73,91
5,39	13:40	69,94
5,68	13:50	81,85
4,77	14:00	48,48
5,39	14:10	69,94
4,15	14:20	31,92
4,96	14:30	54,50
4,92	14:40	53,20
5,25	14:50	64,63
4,49	15:00	40,43
5,44	15:10	71,91
5,78	15:20	86,25
4,49	15:30	40,43
5,49	15:40	73,91
4,77	15:50	48,48
4,49	16:00	40,43
4,58	16:10	42,91
5,01	16:20	56,17
4,87	16:30	51,59

4,68	16:40	45,78
------	-------	-------

Energia Disponível no Aero Gerador= 475,66Wh

0,00	16:40
------	-------

Energia disponível no fio = 1022,57Wh

Tabela D13 – Fonte Solar.

19/8/2007		
R .SOLAR	E. SOLAR	HORA
47	19,44	09:30
65	26,89	09:40
65	26,89	09:50
47	19,44	10:00
71	29,37	10:10
71	29,37	10:20
73	30,20	10:30
71	29,37	10:40
75	31,02	10:50
77	31,85	11:00
75	31,02	11:10
81	33,51	11:20
79	32,68	11:30
79	32,68	11:40
79	32,68	11:50
79	32,68	12:00
79	32,68	12:10
77	31,85	12:20
77	31,85	12:30
77	31,85	12:40
71	29,37	12:50
73	30,20	13:00
67	27,72	13:10
67	27,72	13:20
69	28,54	13:30
63	26,06	13:40
65	26,89	13:50
63	26,06	14:00
65	26,89	14:10
57	23,58	14:20
53	21,92	14:30
51	21,10	14:40
47	19,44	14:50
39	16,13	15:00
27	11,17	15:10
33	13,65	15:20
33	13,65	15:30
25	10,34	15:40
23	9,51	15:50
21	8,69	16:00
13	5,38	16:10
3	1,24	16:20
	0,00	16:30

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)