



Universidade Federal
de Campina Grande

CENTRO DE CIÊNCIAS E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Implantação do Sistema Eólico-Fotovoltaico
como Alternativa Energética para a Zona
Rural

Estágio Supervisionado
Relatório Final

Aluno: Fábio da Silva Furtado

Orientador: Prof. Dr. Carlos Minor Tomiyoshi

Campina Grande – PB
Novembro de 2006

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Recursos Naturais
Departamento de Engenharia Agrícola

Implantação do Sistema Eólico-Fotovoltaico
como Alternativa Energética para a Zona
Rural

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^o Dr. Carlos Minor Tomiyoshi

Prof^o Dr.^a Vera Lúcia Antunes de Lima

Prof^o Dr. Jógerson P. Gomes Pereira

ASSINATURA

8.0 *Carlos Minor Tomiyoshi*

9.0 *Vera Lúcia Antunes de Lima*

9.0 *Jógerson P. Gomes Pereira*

Campina Grande, 06 de novembro de 2006



Biblioteca Setorial do CDSA. Abril de 2021.

Sumé - PB

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todos os anos da minha vida

*Aos meus pais
José Adão Rodrigues Furtado e
Hildean Henrique da Silva*

*Às minhas duas irmãs, Andréia e Adriana
Aos meus colegas de curso Damásio e Iacer
E a todas as pessoas que estiveram envolvidas no projeto*

Sumário

	Página
Apresentação	vii
1.0 - Introdução	1
2.0 - Revisão Bibliográfica	3
2.1 - Energia Solar	3
2.1.1 - Radiação Solar	3
2.1.1.1 - Instrumentos de Medição da Radiação Solar	5
2.1.2 - Geometria Sol-Terra	9
2.1.3 - Energia Fotovoltaica	11
2.1.3.1 - Histórico da Geração Fotovoltaica	11
2.1.3.2 - Componentes de um sistema fotovoltaico	12
2.1.3.3 - Efeito Fotovoltaico	14
2.1.3.4 - Tipos de Células Fotovoltaicas	15
2.1.3.5 - Módulos Fotovoltaicos	17
2.2 - Energia Eólica	19
2.2.1 - Mecanismos de Formação dos Ventos	19
2.2.2 - Relação entre Velocidade do Vento e Altura	20
2.2.3 - Potencial Eólico do Brasil	21
2.2.4 - Princípios Básicos da Energia Eólica	22
2.2.5 - Curva de Potência do Aerogerador	24
2.2.6 - Componentes de um Sistema Eólico	24
2.2.6.1 - Rotores Eólicos	26
2.2.6.2 - Transmissão e Caixa Multiplicadora	27
2.2.6.3 - Geradores Eólicos	27
2.2.6.4 - Mecanismos de Controle	28
2.2.6.5 - Torre	29
3.0 - Material e Métodos	30
3.1 - Caracterização do Local de Instalação do Projeto	30
3.2 - Dados Solarimétricos Locais	30
3.3 - Principais Equipamentos Selecionados para o Projeto	31
3.4 - Montagem dos Sistemas Eólico e Fotovoltaico	34
4.0 - Resultados e Discussão	36

4.1 – Monitoramento das Condições do Vento	36
4.2 – Funcionamento dos Sistemas Eólico e Fotovoltaico	36
5.0 – Conclusões	38
6.0 – Referências Bibliográficas	39

Lista de Figuras

		Página
Figura 1	Fotografia de um Heliógrafo	6
Figura 2	Actinógrafo tipo Robitzsch	6
Figura 3	Piranômetro fotovoltaico	7
Figura 4	Fotografia de um Piranômetro tipo branco e preto e outro termoeletrico de precisão tipo psp	8
Figura 5	Piroheliômetro de incidência normal	8
Figura 6	Índices médios anuais de insolação diária no Brasil	9
Figura 7	Radiação solar global diária - média anual típica	10
Figura 8	Evolução da produção mundial de módulos fotovoltaicos	11
Figura 9	Esquema de um sistema fotovoltaico	12
Figura 10	Arranjo do Painel Fotovoltaico	16
Figura 11	Curva característica I_xV mostrando a corrente I_{SC} e a tensão V_{oc}	17
Figura 12	Curva típica de potência versus tensão	17
Figura 13	Parâmetros da potência máxima	18
Figura 14	Efeito da intensidade luminosa nos painéis solares	18
Figura 15	Efeito causado pela temperatura na célula fotovoltaica	18
Figura 16	Comportamento da velocidade do vento em função da altura e do local	20
Figura 17	Velocidade média anual do vento no Brasil a 50m de altura	21
Figura 18	Princípio de funcionamento básico de um aerogerador	23
Figura 19	Curva de Potência do Aerogerador	24
Figura 20	Componentes de um sistema eólico	25
Figura 21	Fluxo separado (estol) em volta do perfil da pá eólica	28
Figura 22	Fluxo aderente ao perfil da pá eólica	29
Figura 23	<i>Aerogerador GERAR246</i>	32
Figura 24	<i>Curva de Potência do Controlador de carga</i>	32
Figura 25	<i>Fotografia dos dois controladores de carga fotovoltaicos, e do controlador de carga eólico</i>	33
Figura 26	<i>Inversor de senóide modificada</i>	33
Figura 27	<i>Baterias</i>	34
Figura 28	<i>Vista Frontal do Conjunto de Painéis Fotovoltaicos</i>	35
Figura 29	<i>Ligação dos Painéis Fotovoltaicos em Série</i>	35
Figura 30	<i>Instalação da Torre Eólica</i>	35
Figura 31	<i>Visão Geral dos Sistemas Eólico e Fotovoltaico</i>	35
Figura 32	Quadro do PLC - Programmable Controller System	38

Apresentação

A Fundação Parque Tecnológico da Paraíba em convênio com a Secretaria Especial de Aquicultura e Pesca – SEAP, ligado à Presidência da República - PR, tendo como colaboradores a Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, através do Programa de Estudos e Ações para o Semi-Árido – PEASA, desenvolve desde novembro de 2004 o Projeto de Cultivo de Camarão, Halófitas e Sal – PCHS. Este projeto tem como objetivo geral criar um pequeno empreendimento agroindustrial sustentável que utiliza o rejeito de dessalinizador – na criação de camarão marinho – que possa ser replicado em outras comunidades rurais com poços salinizados.

O projeto PCHS foi implantado na comunidade Poleiros, zona rural do município de Barra de Santa Rosa-PB, região do curimataú, distante aproximadamente 120 km da capital do estado João Pessoa.

A implantação de uma mini-usina eólico-fotovoltaica faz parte deste projeto, e vem a completar um sistema híbrido de energia, que ainda conta com a energia fornecida pela companhia elétrica local, e com a energia produzida por gerador a diesel.

Esta medida tem como objetivos baixar custos operacionais do projeto e garantir um suprimento de energia de forma ininterrupta ao longo do cultivo dos camarões. Evitando assim, que ocorram perdas devido à falta de oxigenação da água dos tanques onde são criados os camarões, por exemplo.

1.0 - Introdução

A energia tem sido através da história a base do desenvolvimento das civilizações. Nos dias atuais são cada vez maiores as necessidades energéticas para a produção de alimentos, bens de consumo, bens de serviço e de produção, lazer, e finalmente para promover o desenvolvimento econômico, social e cultural. É assim, evidente a importância da energia não só no contexto das grandes nações industrializadas, mas principalmente naquelas em via de desenvolvimento, cujas necessidades energéticas são ainda mais dramáticas e prementes.

Atualmente, mais de 90% da energia produzida no Mundo, procedem de combustíveis fósseis, como o carvão, petróleo e o gás natural. Fazendo com que suas reservas diminuam a um ritmo insustentável.

Nos últimos anos, no entanto, houve uma pequena alteração nesse quadro, devido à geração de energia através das chamadas fontes alternativas.

As fontes alternativas de energia vêm através dos tempos ganhando mais adeptos e força no seu desenvolvimento e aplicação, tornando-se uma alternativa viável para a atual situação em que o mundo se encontra. Com as crises de petróleo, dificuldade de construção de centrais hidroelétricas, termelétricas, usinas nucleares e outras formas de energia suja, como são classificadas, em razão de causarem grande degradação ambiental.

A energia a partir de então, passou a ser classificada em duas categorias: as convencionais e as alternativas.

As formas convencionais de obtenção da energia ocorrem principalmente, através das gerações: hidroelétrica, termelétrica, nuclear, etc. Amplamente utilizadas no Mundo, devido a fatores econômicos e de eficiência na geração.

As fontes de energias alternativas possuem maior custo e menor eficiência do que as fontes convencionais. Porém, produzem energia de forma limpa, sem emissão de gases poluentes para a atmosfera. Como os que são gerados na queima dos combustíveis fósseis por termelétricas; e na degradação da massa florestal inundada, que ocorre nos grandes lagos das represas hidrelétricas, por exemplo. A radiação solar, a força dos ventos e a biomassa, são as principais fontes de energia alternativa utilizadas atualmente.

Segundo dados de 2006 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, no Brasil são gerados 96.341 MW de potência, dos quais 75% correspondem à geração hidroelétrica. Ao passo que a geração eólica e a fotovoltaica juntas não chegam a 0,5 % desse total.

Com relação à geração fotovoltaica, a pequena participação na matriz energética brasileira se deve ao fato de que, atualmente, a grande maioria dos projetos instalados visa ao atendimento de comunidades isoladas da rede de energia elétrica, principalmente das regiões Norte e Nordeste; e não à produção em larga escala para o fornecimento de energia aos grandes centros urbanos.

Ao mesmo tempo, o parque eólico brasileiro é constituído por um limitado número de centrais eólicas, localizadas principalmente ao longo do litoral Nordestino, e tendo capacidade de aproximadamente 187 MW de potência.

Apesar de estudos recentes apontarem um potencial de geração de 60.000 MW para o país.

Em outros países, a geração de energia através das fontes eólica e fotovoltaica se encontra em processo de expansão. Prova disso é que os Estados Unidos e o Japão, apesar de possuírem índices de insolação menores do que os do Brasil, já aprontam para o ano de 2010 a construção de 1 milhão de casas solares, e a instalação de usinas com capacidade de geração de 4.600 MW de potência fotovoltaica, respectivamente. E mais, há para a União Européia o projeto de 500 mil tetos solares, para os próximos 5 anos.

Com relação à geração eólica, existem 30 mil turbinas de grande porte em operação no mundo, com capacidade instalada da ordem de 13.500 MW, sendo que os campeões de uso dos ventos são a Alemanha, a Dinamarca e os Estados Unidos, seguidos pela Índia e a Espanha.

O presente relatório tem como objetivo apresentar alguns aspectos construtivos e operacionais de uma mini-usina eólico-fotovoltaica, instalada em uma comunidade rural do semi-árido nordestino. Cujas funções são garantir o contínuo fornecimento de energia elétrica necessária ao desenvolvimento de algumas atividades, tais como: bombeamento d'água e acionamento de aeradores de tanques de criação de camarões.

2.0 - Revisão Bibliográfica

2.1 - Energia Solar

A energia solar é a origem de todas as formas de energia que o ser humano vem utilizando durante sua história. Constituindo-se numa das alternativas para solucionar a questão do abastecimento energético no futuro.

O Sol brilha a mais de 5 bilhões de anos e, calcula-se que existirá por mais 6 bilhões, fornecendo energia, tanto na forma de calor quanto de luz, por um período inesgotável, na escala terrestre de tempo.

A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes, e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico.

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são mais usados em aplicações residenciais e comerciais. Os concentradores solares destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor.

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação, sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Entre esses efeitos, destacam-se o termoelétrico e fotovoltaico. O primeiro caracteriza-se pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, em condições específicas. No segundo, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, por meio do uso de células solares.

No Brasil, o aquecimento de água é mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste, devido a características climáticas. Ao passo que, a geração fotovoltaica de energia elétrica é mais verificada nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica convencional.

2.1.1 - Radiação Solar

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia. O que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período.

Essa energia se propaga no espaço isotropicamente, na forma de radiação, nos comprimentos de onda, desde $0,1 \mu\text{m}$, até cerca de $8 \mu\text{m}$. Com comprimento de maior intensidade emissiva em $0,55 \mu\text{m}$, correspondente à cor verde.

A função de distribuição de Planck é utilizada para representar a radiação emitida pelo Sol, dada pela expressão (1). Esta função fornece a quantidade de radiação que um corpo negro, a temperatura T , emite em cada comprimento de onda λ .

$$B_{\lambda}(T) = \left(\frac{a}{\lambda^5 \left(e^{\frac{b}{\lambda T}} - 1 \right)} \right) \quad (1)$$

Em que $B_{\lambda}(T)$ é a emissividade espectral de um corpo negro à temperatura T . As constantes a e b podem ser determinadas através das expressões 2a e 2b:

$$a = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \quad (2a)$$

$$b = \frac{h \cdot c}{k} \quad (2b)$$

Onde h é a constante de Planck, $h = 6,63 \times 10^{-27}$ erg.s; " c " é a velocidade da luz; $c = 300.000$ km/s e k é a constante de Boltzmann; $k = 1,38 \times 10^{-16}$ ergs/K.

Ao entrar na atmosfera terrestre, a radiação solar e seu espectro, sofrem algumas modificações devido a espalhamentos sucessivos por material particulado em suspensão e absorções em determinados comprimentos de onda específicos por elementos presentes na atmosfera, tais como O_3 , H_2O , O_2 e CO_2 .

A *constante solar* é definida como sendo o fluxo radiante que incide em uma superfície unitária, perpendicularmente ao feixe da radiação solar, a uma distância média entre a Terra e o Sol.

Dados recentes da WMO (World Meteorological Organization) indicam um valor de 1.367 W/m^2 , para a Constante Solar, ou radiação extraterrestre.

Aproximadamente 30 % da radiação entrante na atmosfera é refletida, sem mudança na amplitude de onda, 47 % é absorvida pela atmosfera e pela superfície terrestre, provocando um aumento de temperatura e, em seguida, sendo irradiada novamente para o espaço. Apenas os 23 % restantes penetram no sistema terrestre e passam a ser a força motriz de ventos, correntes, ondas, modelando nosso clima e proporcionando o ciclo da água. Somente 0,02 % do total, penetram no sistema biológico, por fotossíntese, nas plantas e em outros organismos "produtores".

2.1.1.1 - Instrumentos de Medição da Radiação Solar

Realizar medidas da irradiação solar global e difusa, horária ou diária, em diversas regiões, por longo período de tempo, é extremamente importante para o estabelecimento de uma base de dados de radiação solar confiável. Estes dados serão utilizados, entre outras coisas, para a elaboração de modelos teóricos, para testar os modelos já existentes, para estimar o desempenho de equipamentos solares, para dimensionar sistemas e determinar o potencial da energia solar em determinada região.

Para que a base de dados seja confiável, é importante que uma série de cuidados sejam tomados, tais como: estabelecer um espaçamento ótimo entre os instrumentos de medida, acumular séries de medidas por um longo período de tempo, realizar calibrações e manutenção periódicas nos medidores. Sem precauções como as citadas, as séries de medidas podem ser inutilizadas.

Os instrumentos de medida da intensidade da radiação solar são, em geral, de dois tipos: Piranômetros, que aceitam radiação de todo o hemisfério e os piroheliômetros que aceitam a radiação de apenas uma direção, mais precisamente através de um ângulo sólido de cerca de $5,7^\circ$.

Os instrumentos solarimétricos medem a potência incidente por unidade de superfície, ao longo de determinado período, integrada sobre diversos comprimentos de onda. São detectados comprimentos de onda compreendidos nos intervalos entre $0,3$ e $0,4 \mu\text{m}$, parte da região do ultravioleta, $0,4$ a $0,7 \mu\text{m}$, região do visível, e de $0,7$ a $5 \mu\text{m}$, região do infravermelho. Usualmente, são medidas a radiação global e, com menor frequência, as suas componentes difusa e direta.

Os instrumentos que medem a intensidade da radiação, que incide na superfície terrestre, possuem uma sensibilidade que cobre um intervalo de comprimento de onda maior do que as células solares. Portanto, na realidade, a energia absorvida pelas células solares é menor do que a que os instrumentos de medida apontam. Devido a esta diferença de sensibilidade entre os instrumentos de medida e os elementos fotogeradores, é interessante a realização de medidas utilizando células fotovoltaicas calibradas.

Os principais instrumentos de medida utilizados são:

1) Heliógrafo:

Este equipamento, inventado por Campbell em 1853 e modificado por Stokes em 1879, consiste em uma esfera sólida de vidro polido comportando-se como uma lente convergente capaz de concentrar, em uma região, toda a luz incidente sobre ela, Figura 2. Colocando-se nesta região uma carta que, como resultado da exposição à irradiação, acima de certo valor, se enegrece; é possível estimar a insolação diária medindo-se o comprimento da mancha enegrecida formada.



Figura 1 - Fotografia de um Heliógrafo

Este instrumento pode ser utilizado sobre condições das mais adversas. Sua principal vantagem é não precisar de calibração. Basta que sua construção esteja de acordo com as recomendações da Organização Meteorológica Mundial, estejam corretamente testados assegurando-se uma homogeneidade com dados tomados em diferentes latitudes. Por outro lado, deve-se seguir rigorosamente o compromisso da manutenção diária como as trocas das cartas de papel, limpeza básica para minimizar os efeitos causados por intempéries como a incidência de neve, poeira, ventos.

Um problema relacionado com este tipo de equipamento surge devido à imprecisão na tomada dos dados feita, essencialmente, através das mãos imprecisas do homem.

Em geral, o valor da irradiância mínima para se iniciar a contagem das horas está entre 100 e 200 W/m². Entretanto, uma recomendação da Organização Meteorológica Mundial estabelece que o valor do limiar deva ser de 120 W/m². Para diferentes épocas do ano, devem-se utilizar diferentes formatos de carta de registro, pois o foco da radiação traçará diferentes trajetórias. Um tipo de carta para os equinócios, outro para o solstício de verão e outro para o solstício de inverno.

2) Actinógrafo

Também chamado de *Actinômetro* ou *Piranógrafos*. É um instrumento muito utilizado devido ao seu baixo custo. Mede a radiação solar total ou difusa, possuindo o sensor e o registrador acoplados na mesma unidade.

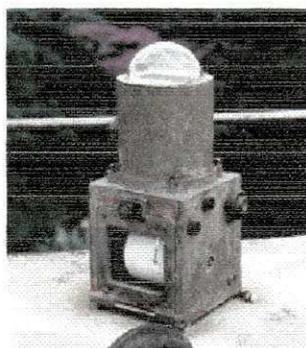


Figura 2 - Actinógrafo tipo Robitzsch

Este instrumento, idealizado originalmente por Robitzsch em 1915, é constituído essencialmente por um receptor bimetalico preso por um extremo e livre pelo outro. Quando a radiação incide sobre o receptor, este se curva devido à diferença entre os coeficientes de dilatação dos metais que o compõem. Uma pena presa na extremidade livre registra esta deformação, proporcional à intensidade da radiação incidente, em uma carta de papel montada sobre um tambor acionado por um mecanismo de engrenagens mecânicas.

Os actinógrafos só devem ser utilizados para medições de totais diários de radiação solar global ou difusa, sendo necessária a planimetria da carta com o registro. Contando toda a operação, estima-se que os erros sejam da ordem de 20 % e mesmo com calibrações periódicas, os erros não são inferiores a 5%, além disso, sua resposta a variações na radiação é lenta e não há uma compensação de temperatura, sendo considerado um instrumento de terceira classe.

3) Piranômetro

Denominados, eventualmente, como solarímetros, estes instrumentos medem a irradiação global (direta + difusa). São instrumentos com os quais são feitas a maioria das medidas de radiação existentes. Existem basicamente dois tipos de piranômetros mais frequentemente utilizados, a saber: piranômetros fotovoltaicos e piranômetros termelétricos.

3.1) Piranômetro Fotovoltaico

São radiômetros que possuem como elemento sensível uma célula solar de silício, em geral monocristalino que ao ser iluminado gera uma corrente elétrica devido a fótons com energia suficiente para serem absorvidos pelo material – *efeito fotovoltaico*. Esta corrente, na condição de curto-circuito, é proporcional à intensidade da radiação incidente.

A maior restrição a este instrumento, diz respeito à seletividade espectral de sua resposta, fenômeno inerente ao comportamento do detector, por isso impossível de se corrigir. Outros problemas como a refletividade das células e a dependência da resposta com a temperatura já possuem correções satisfatórias.

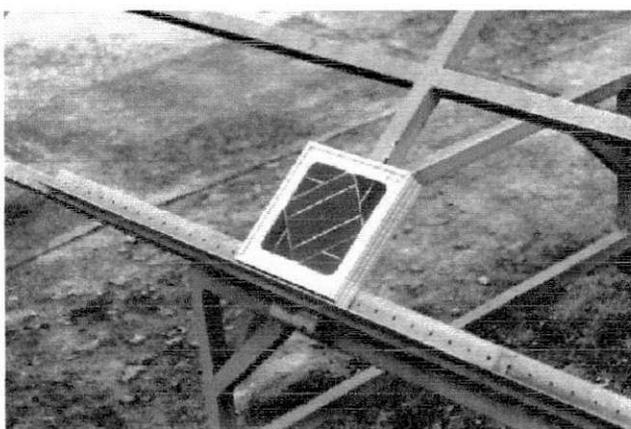


Figura 3 - Piranômetro fotovoltaico

3.2) Piranômetro Termelétrico

Estes aparelhos utilizam como elemento sensível uma pilha termelétrica, constituída por termopares em série. Tais elementos geram uma tensão elétrica

proporcional à diferença de temperatura entre suas juntas, fenômeno conhecido como *efeito Seebeck*. Portanto, é possível relacionar a diferença de potencial medida na saída do instrumento com a radiação incidente. Existem dois Piranômetros termelétricos mais amplamente usados, a saber:

Piranômetro do tipo branco e preto - possui um receptor pintado, alternadamente, de preto e branco. Neste caso, as juntas quentes da termopilha estão em contato com as superfícies negras, altamente absorventes. As pontas frias estão em contato com as superfícies brancas, de grande refletividade.

Piranômetro com toda a superfície receptora pintada de preto - onde estão conectadas as juntas quentes. As juntas frias são associadas a um bloco de metal de grande condutividade térmica, colocadas no interior do equipamento, resguardadas da radiação solar e tendo, aproximadamente a temperatura do ar.



Figura 4 - Fotografia de um Piranômetro tipo branco e preto e outro termoeletrico de precisão tipo psp

4) Piroheliômetro

Por ter um ângulo de abertura pequeno, capaz de captar a radiação proveniente do Sol e cercanias (região circunsolar), é um instrumento utilizado para medir a radiação direta. Em geral, utiliza-se uma montagem equatorial de seguimento solar, com movimento em torno de um único eixo, ajustado periodicamente para corrigir a variação da declinação solar. São instrumentos de grande precisão. Quando corretamente utilizados, apresentam erros da ordem de 0,2 % a 0,5 %. Existem vários tipos de piroheliômetros, alguns são conhecidos como padrões de referências: piroheliômetro de Ângstrom, piroheliômetros de disco de prata de Abbot, piroheliômetro de circulação de água de Abbot. Com características distintas, mas denominados piroheliômetros auto-calibráveis, piroheliômetro de termopar.



Figura 5 - Piroheliômetro de incidência normal.

2.1.2 - Geometria Sol-Terra

A Terra realiza um *movimento de translação* sobre uma órbita pouco excêntrica em torno do Sol em um período de um ano. Ao mesmo tempo, realiza um *movimento de rotação* em torno de si mesma, de forma a completar uma volta em um período definido de dia. Ao realizar o movimento de translação determina-se um plano denominado de *plano da eclíptica*. O eixo em torno do qual é realizado o movimento de rotação possui uma inclinação fixa no espaço que forma um ângulo de $23,45^\circ$ em relação à perpendicular ao plano da eclíptica.

O ângulo compreendido pelo plano determinado pelo Equador terrestre e o plano da eclíptica é denominado de *declinação*, δ . Seu valor pode ser determinado através da expressão (3):

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \cdot \text{sen}\left(\frac{360(284 + d_n)}{365}\right) \quad (3)$$

Onde d_n é o dia Juliano do ano, $1 < d_n < 365$.

Os valores obtidos através dessa expressão, ao longo do ano, estão compreendidos no intervalo: $-23.45^\circ < \delta < +23.45^\circ$.

Uma das conseqüências da variação da declinação solar é a ocorrência de dias longos e noites curtas, no verão; e o inverso durante os meses de inverno. O que, portanto, resulta numa variação da insolação ao longo do ano. Sendo esse fenômeno verificado de forma mais contundente nas regiões polares.

No caso do Brasil, um país com imensa parte do seu território próximo à linha do Equador, a média anual de insolação é apresentada na Figura 6, segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000).

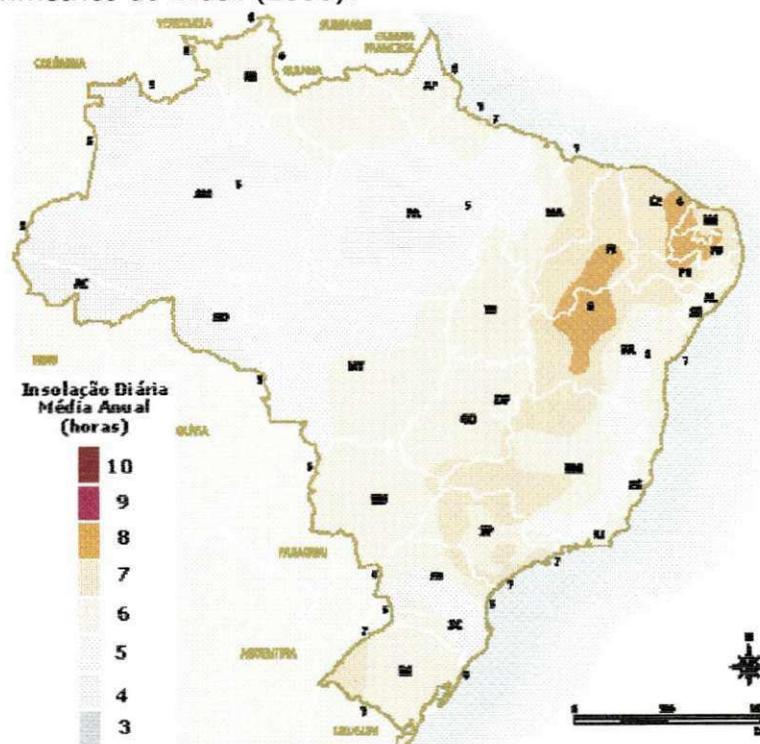


Figura 6 - Índices médios anuais de insolação diária no Brasil
Fonte: ANEEL

De acordo com o mapa, observa-se que os maiores índices anuais de insolação, localizam-se no interior nordestino.

A Figura 7 apresenta os valores médios anuais da Radiação solar global diária incidente no território brasileiro. Neste mapa, se verifica que cerca de 70 % do território paraibano, parte sul do estado do Rio Grande do Norte, e norte de Pernambuco, são registradas as maiores taxas de radiação nacional, da ordem de 20 MJ/m²dia. Já em uma fração de Minas Gerais, e em metade da região sul, foram medidas as menores taxas de radiação, de cerca de 14 MJ/m²dia.

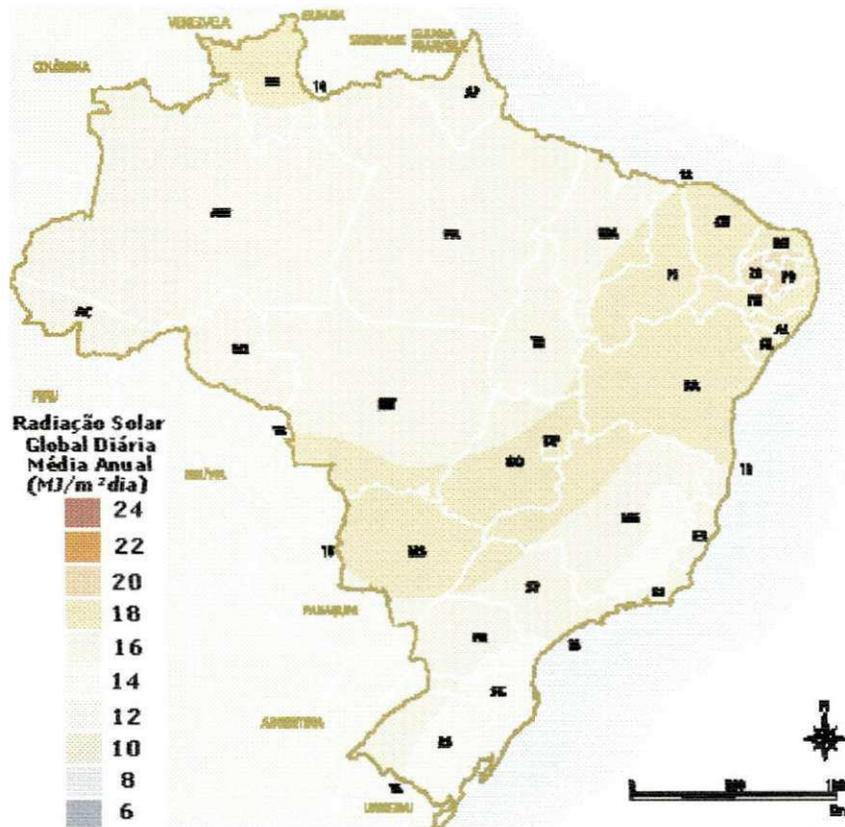


Figura 7 – Radiação solar global diária - média anual típica (MJ/m².dia)
Fonte: ANEEL

O aproveitamento dessa energia, no Hemisfério Sul, onde está localizado o Brasil, é maximizado através do posicionamento dos coletores ou painéis solares orientados para o Norte, porque na maior parte do ano, o Sol está posicionado nessa direção, com relação às regiões localizadas nesse hemisfério. Devendo-se proceder de forma oposta, quando se tratar de regiões localizadas no Hemisfério Norte.

O ângulo de inclinação utilizado para o posicionamento do coletor ou painel solar deve ser similar ao da latitude local e o período do ano em que se requer mais energia.

2.1.3 - Energia Fotovoltaica

2.1.3.1 - Histórico da geração Fotovoltaica

As primeiras aplicações do efeito fotovoltaico foram para o uso espacial como fontes de eletricidade para satélites, no final da década de 50. Já os primeiros estudos datam de 1839, ano em que Edmund Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico do silício, quando ele produziu uma corrente, expondo eletrodos de prata à radiação solar em um eletrólito. Contudo, a primeira célula produzida foi com selênio em 1883 por Fritts e Uljanin. A explicação física da junção PN por Bardeen e Brattain e o descobrimento do transistor por Shockley em 1949, fatos que marcaram o início da era do semicondutor, possibilitaram o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica. Na década de 70, com a chamada *crise do petróleo*, se iniciaram as primeiras aplicações para uso terrestre (Fraidenraich e Lyra, 1995).

Desde então, a indústria fotovoltaica mundial tem demonstrado um crescimento médio do setor, nos últimos 4 anos, de quase 39 % ao ano. Chegando a 48% ao ano, quando se analisa somente o mercado Europeu. Em 2003, a produção mundial alcançou os 744,08 MW, desses quase 49 % vieram do Japão.

A matéria-prima predominante foi o silício policristalino, com quase 62 %, seguido do monocristalino, com pouco menos de 27 %. O silício amorfo que em 2002 representou 5,8 % de toda produção, em 2003 não chegou aos 4 % (Maycock, 2004).

A principal aplicação continua sendo a conexão à rede de distribuição, com 55%, o que se revela uma tendência. O principal motivo é o preço, que para instalações de grande porte chegou a US\$ 2,7 por watt. Já para as instalações comerciais e residenciais de pequeno porte, existe ainda a necessidade de subsídios governamentais; tais como na Califórnia, Estados Unidos, que conseguiu reduzir o custo para US\$ 3,5 por watt. No Brasil esse preço permanece acima dos US\$ 7 por watt.

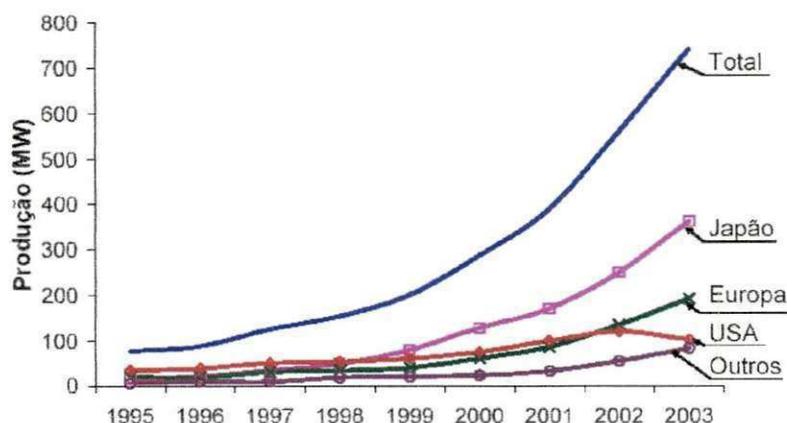


Figura 8 - Evolução da produção mundial de módulos fotovoltaicos
(Fonte: MAYCOCK, 2004)

2.1.3.2 - Componentes de um sistema fotovoltaico

Os elementos fundamentais que constituem o sistema fotovoltaico autônomo são: a carga elétrica e o gerador fotovoltaico. Em geral, sistemas tão simples permitirão somente consumos proporcionais à irradiação solar e em períodos em que ocorra coincidência entre geração e consumo.

Para contornar este problema e aumentar as possibilidades de utilização do sistema, é necessário dotar o conjunto carga-módulo de um subsistema de acumulação de energia. Este é responsável pelo armazenamento da energia quando a geração é superior ao consumo e pelo abastecimento da carga quando há consumo e não há geração. Existem diversas formas de armazenar a energia, porém, é freqüente a utilização de baterias eletroquímicas secundárias. As quais, depois de descarregadas, podem ser conduzidas ao estado de carga inicial, através da passagem de uma corrente elétrica na direção oposta à descarga. Normalmente são utilizadas baterias automotivas de chumbo-ácido.

Em razão das características intrínsecas das baterias geralmente utilizadas neste tipo de subsistema, é conveniente instalar um sistema eletrônico de controle da carga e da descarga. Este equipamento, denominado regulador ou controlador de carga, tem como função evitar cargas ou descargas excessivas no acumulador, aumentando assim, sua vida útil.

Em algumas ocasiões, é necessário adaptar as características da corrente fornecida pelo conjunto módulo-bateria às cargas, sendo freqüente o uso de inversores estáticos, cujas eficiências de trabalho devem ser também consideradas no dimensionamento de todo o conjunto.

Para garantir certa continuidade no fornecimento energético, pode ser conveniente utilizar um gerador auxiliar como o grupo diesel. Porém, em geral em instalações de baixa carga, o alto custo deste tipo de equipamento auxiliar inviabiliza a sua utilização.

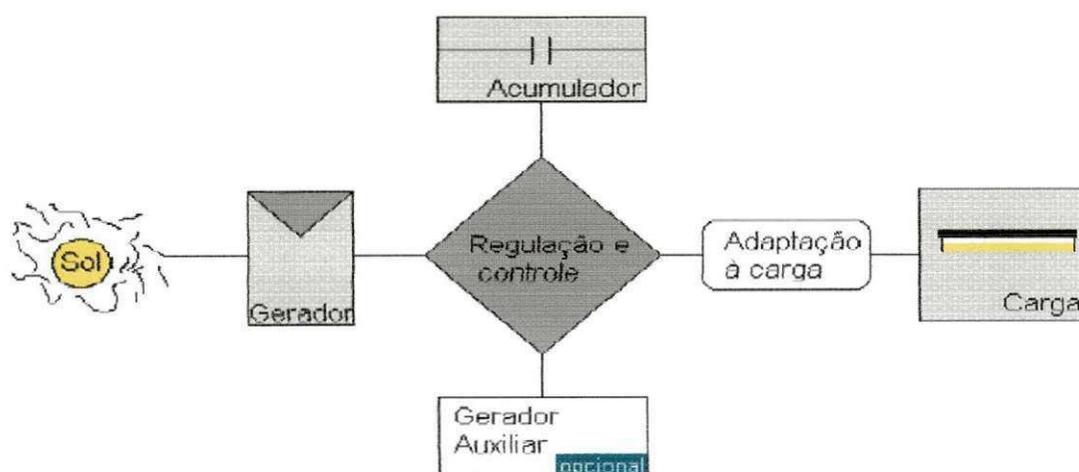


Figura 9 - Esquema de um sistema fotovoltaico

Existem três categorias de sistemas fotovoltaicos: os sistemas isolados, os híbridos e os conectados à rede. Estes obedecem a uma configuração básica, constituída de uma unidade de controle de potência e também uma unidade de armazenamento.

Os sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Que pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos. Ou ainda pode-se armazenar na forma de energia gravitacional, quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento.

É utilizado um dispositivo para controlar a carga e a descarga na bateria, em sistemas pequenos onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC). E para alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA) é necessário um inversor.

Os sistemas híbridos são aqueles que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia como por exemplo: turbinas eólicas, geração à diesel, módulos fotovoltaicos entre outras.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados para sistemas de médio a grande porte vindo a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas de corrente contínua, o sistema híbrido também apresenta um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções.

Já os sistemas interligados à rede, utilizam grandes números de painéis fotovoltaicos, e não utilizam armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente na rede. Este sistema representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado. Todo o arranjo é conectado a inversores e logo em seguida guiado diretamente na rede.

Além dos componentes mencionados, devemos considerar também como parte dos sistemas a fiação e a estrutura de suporte dos geradores fotovoltaicos.

A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia razoavelmente nova, mas, por ter sido desenvolvida inicialmente para aplicações espaciais possui uma confiabilidade alta e grande durabilidade. Assim, os geradores fotovoltaicos praticamente não necessitam de manutenção e raramente apresentam falhas. Com isso, os problemas encontrados nos sistemas ocorrem, na maioria das vezes, em outros componentes tais como: fiação, lâmpadas, reatores eletrônicos e acumuladores.

Isto ocorre, principalmente, porque estes equipamentos não foram projetados, nem sequer adaptados para utilização em sistemas fotovoltaicos. Para minimizar a ocorrência de falhas, aumentando a confiança nos sistemas fotovoltaicos e diminuindo seus custos, é importante que estes sejam dimensionados de forma correta, cuidadosa e que haja critério na aquisição de seus componentes. Para isso, é necessário considerar as características e particularidades de cada componente adaptando, da melhor forma possível, as tecnologias já consolidadas à tecnologia solar fotovoltaica.

2.1.3.3 - Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra onde totalmente "vazia" (banda de condução).

O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se *dopante n* ou *impureza n*.

Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada *buraco* ou *lacuna* e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se, portanto, que o boro é um *aceitador de elétrons* ou um *dopante p*.

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama *junção pn*. O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado n passam ao lado p onde encontram os buracos que os capturam; isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n, que o torna eletricamente positivo. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n.

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de *Efeito Fotovoltaico*. Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é à base do funcionamento das células fotovoltaicas.

2.1.3.4 - Tipos de Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

A célula de silício monocristalino é historicamente a mais utilizada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade. E a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído. Começando com a extração do cristal de dióxido de silício, onde este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza em 98 e 99 % o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e de custo. Este silício para funcionar como células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,99 %.

Para se utilizar o silício na indústria eletrônica além do alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede. O processo mais utilizado para se chegar as qualificações desejadas é chamado "processo Czochralski". O silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro que é do tipo p. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, vai-se extraindo do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 300 μm .

Após o corte e limpezas de impurezas das fatias, devem-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000 °C.

Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito atingem uma eficiência de até 15 % podendo chegar em 18 % em células feitas em laboratórios.

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação com as células de silício monocristalino.

O processo de pureza do silício utilizado na produção das células de silício policristalino é similar ao processo do Si monocristalino, o que permite obtenção de níveis de eficiência compatíveis. Basicamente, as técnicas de fabricação de células policristalinas são as mesmas na fabricação das células monocristalinas, porém com menores rigores de controle.

Podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos só o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas. Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5 % em escalas industriais.

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil.

Por outro lado, o silício amorfo apresenta vantagens que compensam as deficiências acima citados, são elas: processo de fabricação relativamente simples e barato, possibilidade de fabricação de células com grandes áreas e baixo consumo de energia na produção.

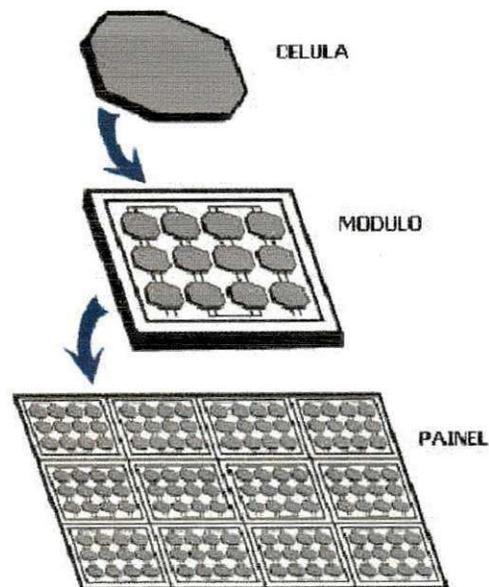


Figura 10 - Arranjo do Painel Fotovoltaico

2.1.3.5 - Módulos Fotovoltaicos

Pela baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série ou em paralelo.

Ao conectar as células em paralelo, somam-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3 A e tensão muito baixa, em torno de 0,7 V), este arranjo não é utilizado, salvo em condições muito especiais.

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série. Este consiste em agrupar o maior número de células em série onde se soma a tensão de cada célula chegando a um valor final de 12 V. O que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que também funcionam na faixa dos 12 V.

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico. E as principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes:

- Voltagem de Circuito Aberto (V_{oc})
- Corrente de Curto Circuito (I_{sc})
- Potência Máxima (P_m)
- Voltagem de Potência Máxima (V_{mp})
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp})

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de 1.000 W/m^2 (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na célula. As Figuras 11, 12 e 13 apresentam estas curvas.

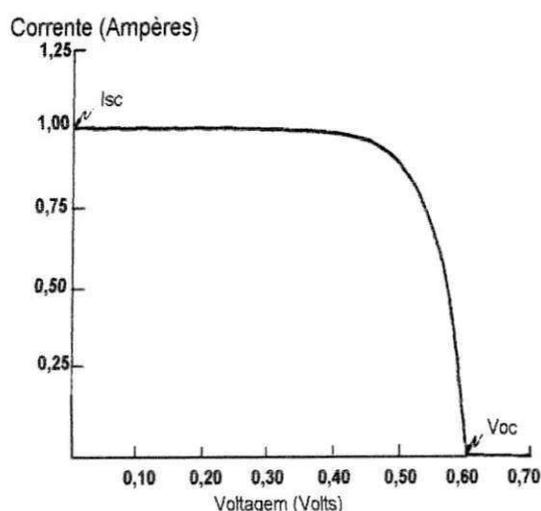


Figura 11 - Curva característica $I \times V$ mostrando a corrente I_{sc} e a tensão V_{oc}

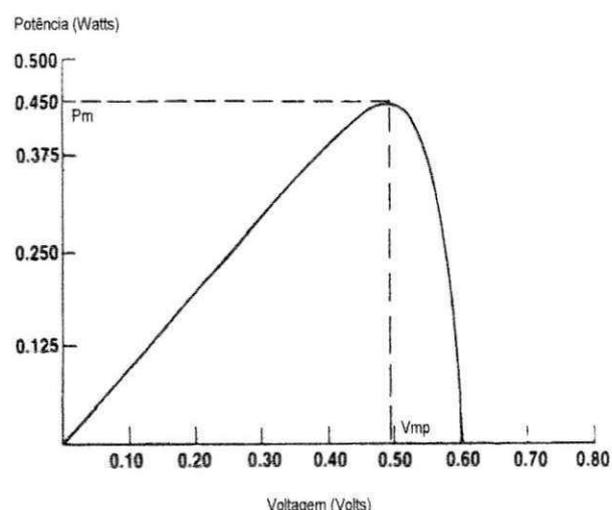


Figura 12 - Curva típica de potência versus tensão

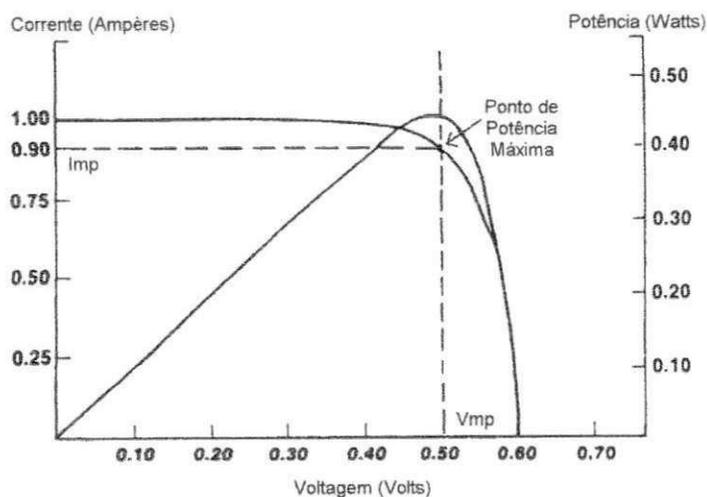


Figura 13 - Parâmetros da potência máxima

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um painel são: a *intensidade luminosa* e a *temperatura das células*. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia abaixando assim os pontos de operação para potência máxima gerada.

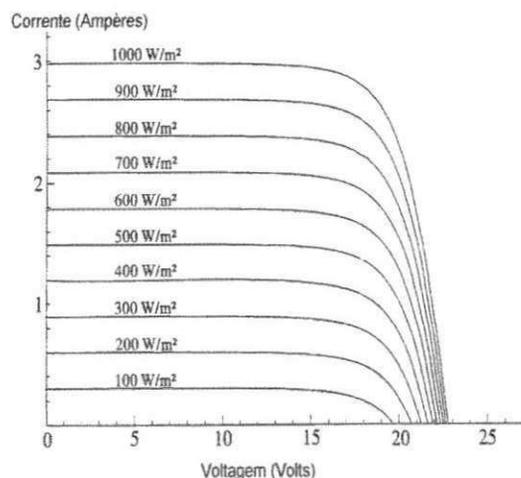


Figura 14 - Efeito da intensidade luminosa nos painéis solares

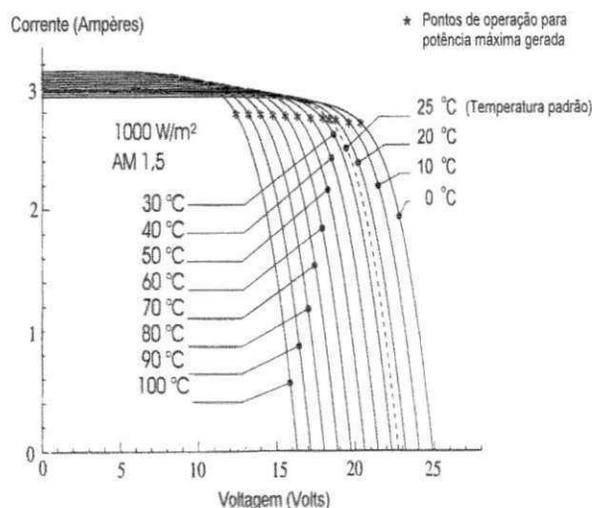


Figura 15 - Efeito causado pela temperatura na célula

2.2 – Energia Eólica

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cataventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água.

Assim como a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades, a saber: bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem energia mecânica.

Para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial.

Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2 % da energia solar absorvida pela Terra são convertidos em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centenas de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

2.2.1 - Mecanismos de Formação dos Ventos

Os ventos são formados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos.

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de "soprar". Pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no Equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes e podem ser classificados em:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes;
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes;
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos;
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas;

Em razão do eixo da Terra está inclinado de 23,45 ° em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, ocorrem variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra, o que resulta em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultados surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas.

As monções são ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra estação.

Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol inerente a cada tipo de superfície (tais como mares e continentes) surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.

Sobreposto ao sistema de geração dos ventos descrito acima se encontram os *ventos locais*, que são originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados. A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas.

2.2.2 - Relação entre Velocidade do Vento e Altura

A velocidade do vento em um determinado local aumenta drasticamente com a altura. Isto se deve a um fenômeno chamado "wind shear". Fricção entre ar mais lento e mais rápido conduz ao aquecimento, velocidade do vento mais baixa e muito menos energia de vento disponível perto do solo.

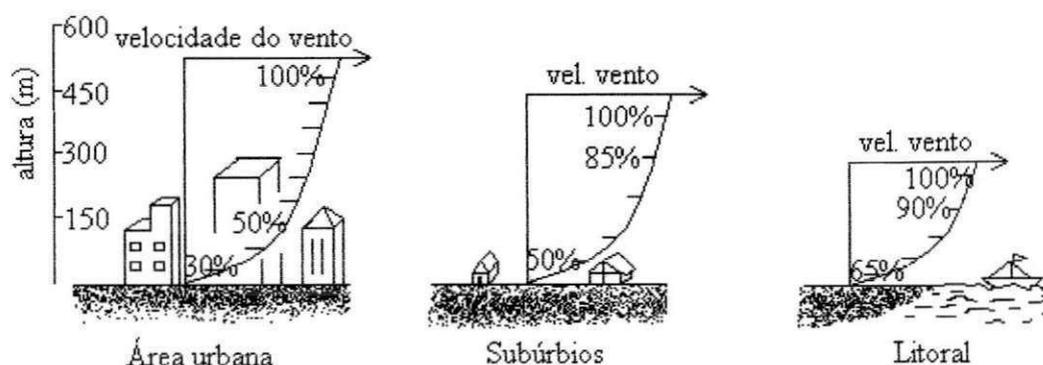


Figura 16 - Comportamento da velocidade do vento em função da altura e do local

Com base neste esquema, percebe-se que em regiões que possuem construções elevadas como prédios, as velocidades razoáveis de vento, só são atingidas após uma elevada altura. Já nas áreas em que só existem casas e pequenas construções, em alturas um pouco menores já se têm ventos satisfatórios. E ao nível do mar, se vê que os ventos já são muito mais rápidos em altitudes menos elevadas que nos exemplos anteriores. Assim, a conversão de energia eólica em regiões com muitos obstáculos fica prejudicada. Porém, mesmo nestas regiões é possível o aproveitamento, mesmo que já em escalas menores.

2.2.3 – Potencial Eólico do Brasil

Vários estudos estimam que o potencial eólico brasileiro gire em torno de 60.000 MW.

A Figura 17 apresenta o panorama do potencial eólico brasileiro. Os recursos apresentados na legenda referem-se à velocidade média do vento e energia eólica média a uma altura de 50 m acima da superfície, para 5 condições topográficas distintas: *zona costeira*, *campo aberto*, *mata*, *morro* e *montanha*.

Ainda na legenda, a classe 1 representa regiões de baixo potencial eólico, de pouco ou nenhum interesse para o aproveitamento da energia eólica. A classe 4 corresponde aos melhores locais para aproveitamento dos ventos no Brasil. As classes 2 e 3 podem ou não ser favoráveis, dependendo das condições topográficas. Por exemplo: um local de classe 3 na costa do Nordeste (zona costeira) pode apresentar velocidades médias anuais entre 6,5 e 8 m/s, enquanto que um local de classe 3 no interior do Maranhão (mata) apresentará apenas valores entre 4,5 e 6 m/s.

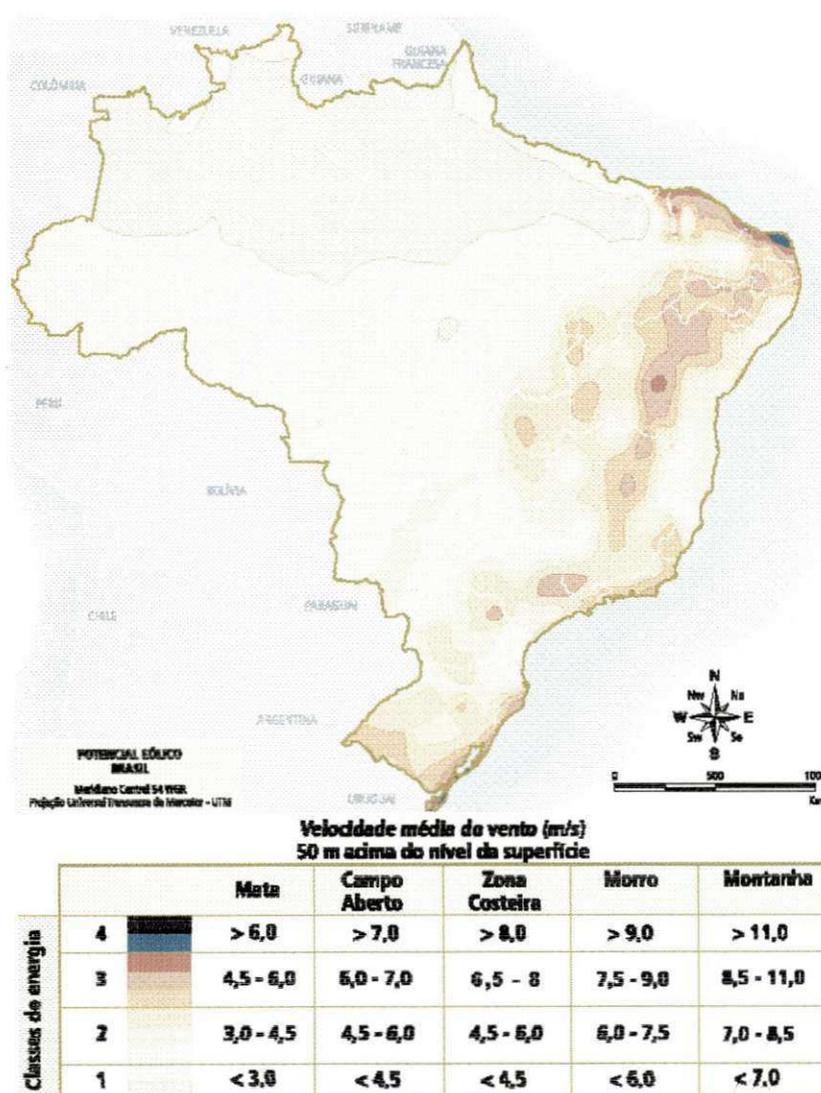


Figura 17 - Velocidade média anual do vento no Brasil a 50 m de altura (Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE)

A Tabela 1 mostra a classificação das velocidades de vento e regiões topográficas utilizadas no mapa da Figura 17. Os valores correspondem à velocidade média anual do vento a 50m de altura em m/s (V_m) e à densidade média de energia média em W/m^2 (E_m). Os valores de E_m foram obtidos para as seguintes condições padrão: altitude igual ao nível do mar, temperatura de 20 °C.

Tabela 1 - Definição das classes de energia eólica
Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE

			Mata	Campo Aberto	Zona Costeira	Morros	Montanhas
Classes de Energia Eólica	4	V_m (m/s)	> 6	> 7	> 8	> 9	> 11
		E_m (W/m^2)	> 200	> 300	> 480	> 700	> 1250
	3	V_m (m/s)	4,5-6	6-7	6,5 - 8	7,5-9	8,5-11
		E_m (W/m^2)	80-200	200-300	250-480	380-700	650-1250
	2	V_m (m/s)	3-4,5	4,5-6	5-6,5	6-7,5	7-8,5
		E_m (W/m^2)	25-80	80-200	100-250	200-380	300-650
	1	V_m (m/s)	< 3	< 4,5	< 5	< 6	< 7
		E_m (W/m^2)	< 25	< 80	< 100	< 200	< 300

2.2.4 – Princípios Básicos da Energia Eólica

A extração de energia dos ventos se dá através do movimento do ar, que incide em pás convenientemente posicionadas, transmitindo assim parte de sua quantidade de movimento às pás. Essa energia é adquirida pelos cata-ventos e turbinas de vento e transformada em energia cinética de rotação.

A potência que o vento transmite, é dada pela expressão (4):

$$P = \frac{\rho \cdot v^3 \cdot A}{2} \quad (4)$$

Onde ρ é a densidade do ar, v é a velocidade do vento e A , a área varrida pelas hélices do rotor.

Logo, para chegar ao cálculo final do potencial eólico (em Watt), é preciso considerar as eficiências mecânicas e elétricas do sistema (η) e o coeficiente de desempenho aerodinâmico (C_p), que depende do vento, rotação e parâmetros de controle da turbina:

$$P = \frac{\rho \cdot v^3 \cdot A \cdot \eta \cdot C_p}{2} \quad (5)$$

Um aumento de 10 % da velocidade do vento resulta em 33 % de aumento da potência. Ao passo que ao se dobrar o diâmetro da hélice, a potência é quadruplicada.

A condição de máxima extração de energia verifica-se para uma velocidade na esteira do rotor (parte posterior) igual a $1/3$ da velocidade não perturbada.

Em condições ideais, o valor máximo da energia captada por um rotor eólico é limitado pela eficiência de Betz dada pelo fator $16/27$ ou $0,593$. Isso significa que 59,3 % da energia contida no fluxo de ar podem ser teoricamente extraídas por uma turbina eólica. Na prática, entretanto, o rendimento aerodinâmico das pás reduz ainda mais este valor. Além de outras perdas, relacionadas com cada componente. E mais, o fato do rotor eólico funcionar em uma faixa limitada de velocidade de vento também irá contribuir para reduzir a energia por ele captada.

Todo sistema eólico somente começa a funcionar a partir de certa velocidade, chamada de *velocidade de entrada*, que é necessária para vencer algumas perdas. Quando o sistema atinge a chamada velocidade de corte um mecanismo de proteção é acionado com a finalidade de não causar riscos ao rotor e à estrutura.

Para os sistemas eólicos, a velocidade de rotação ótima do rotor varia com a velocidade do vento. Um sistema eólico tem o seu rendimento máximo a uma dada velocidade do vento (chamada de velocidade de projeto ou velocidade nominal). Sendo que na prática o rendimento global de um sistema eólico simples é estimado em 20 %.

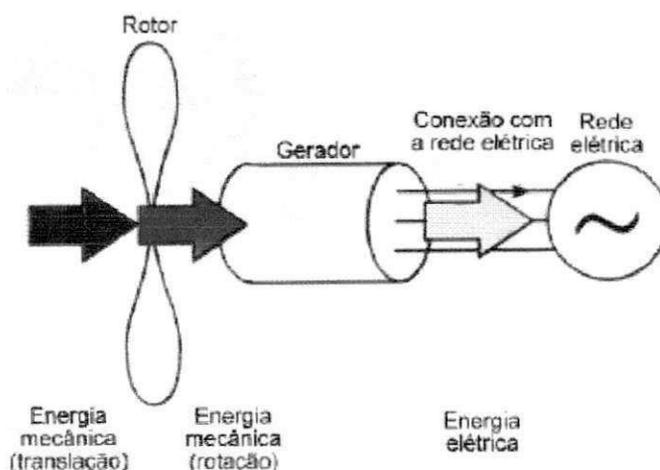


Figura 18 – Princípio de funcionamento básico de um aerogerador

2.2.5 – Curva de Potência do Aerogerador

Na realidade, o coeficiente de desempenho aerodinâmico (C_p) também é função da velocidade do vento. Assim, é usual o fornecimento pelo fabricante de uma curva de potência associada a cada tipo de aerogerador, indicando a energia produzida para uma determinada velocidade de vento. A curva de potência é medida por um anemômetro posicionado em frente à turbina em áreas de pouca intensidade de turbulência.

A Figura 19 apresenta a curva de potência do aerogerador da Enercon E-40/6.44 com 600 KW de potência, em uma torre de 44 m de altura e pás de fibra de vidro reforçada com epóxi, fornecida pela Associação Alemã de Energia Eólica – BWE, em alemão (2002).

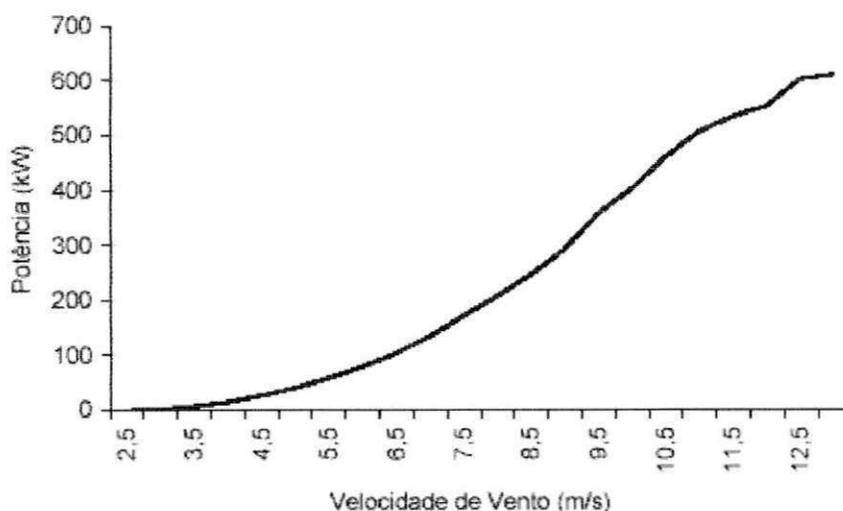


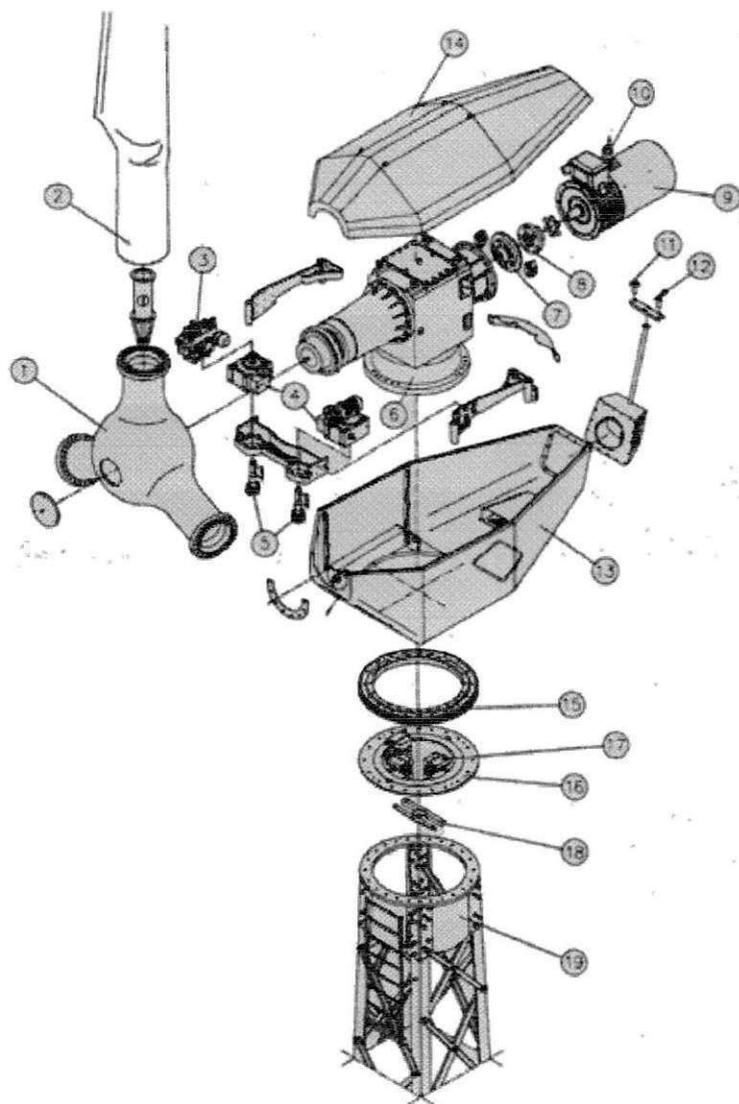
Figura 19 – Curva de Potência do Aerogerador
Fonte: Associação alemã de energia eólica

2.2.6 – Componentes de um Sistema Eólico

Para efeito de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes:

- Vento: Disponibilidade energética do local destinado à instalação do sistema eólico.
- Rotor: Responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação.
- Transmissão e Caixa Multiplicadora: Responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga. Alguns geradores não utilizam este componente; neste caso, o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga.
- Gerador Eólico: Responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.
- Mecanismo de Controle: Responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga, etc.
- Torre: Responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente.
- Sistema de Armazenamento: Responsável por armazenar a energia para produção de *energia firme* a partir de uma fonte intermitente.

- Transformador: Responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica.
- Acessórios: São os componentes periféricos.



Legenda:

1. Cubo do Rotor
2. Pás do Rotor
3. Sistema Hidráulico
4. Sistema de Posicionamento da Nacele
5. Engrenagem de Posicionamento
6. Caixa Multiplicadora de Rotação
7. Disco de Freio
8. Acoplamento do Gerador Elétrico
9. Gerador Elétrico
10. Sensor de Vibração
11. Anemômetro
12. Sensor de direção
13. Nacele(Parte Inferior)
14. Nacele(Parte Superior)
15. Rolamento do Posicionamento
16. Disco de Freio do Posicionamento
17. Pastilhas de Freio
18. Suporte do Cabo de força
19. Torre

Figura 20 - Componentes de um sistema eólico

2.2.6.1 – Rotores Eólicos

O rotor é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica de rotação. É o componente mais característico de um sistema eólico.

Os rotores eólicos podem ser classificados segundo a orientação do eixo. Assim, têm-se os rotores de eixo horizontal e os rotores de eixo vertical.

Rotores de Eixo Horizontal

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*), que atuam perpendicularmente ao escoamento; e forças de arrasto (*drag*), que agem na direção do escoamento. Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento, e dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo).

Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento.

Os rotores de eixo horizontal ao longo do vento (aerogeradores convencionais) são predominantemente movidos por forças de sustentação. Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás (*multivane fans*). Sendo em geral, feitas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás ou em alguns casos (velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico) 1 ou 2 pás. A Figura 3 ilustra as pás de uma turbina eólica de grande porte.

Rotores de Eixo Vertical

Em geral, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto.

Como desvantagens apresentam o fato de suas pás, devido ao movimento de rotação, terem constantemente alterados os ângulos de ataque e de deslocamento em relação à direção dos ventos, gerando forças resultantes alternadas, o que além de limitar o seu rendimento, causa vibrações acentuadas em toda sua estrutura.

Os principais tipos de rotores de eixo vertical são *Darrieus*, *Savonius* e turbinas com torre de vórtices.

2.2.6.2 - Transmissão e Caixa Multiplicadora

A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos.

O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador de forma adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 rpm, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (*tip speed*). Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham a rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1200 a 1800 rpm), tornando necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos.

2.2.6.3 - Geradores Eólicos

Os geradores podem ser basicamente dos tipos "AC" ou "DC", se converterem a energia para a forma de corrente alternada ou contínua (direta), respectivamente.

Nos tipos de geradores de corrente contínua (DC), a energia é convertida, como o nome já indica para a forma direta ou contínua de corrente elétrica e carrega uma bateria que acumula esta energia para uso posterior.

Esta forma de conversão é um pouco incômoda, pois requer um banco relativamente grande de baterias para que se possa ter uma quantidade de energia razoável num determinado lugar, e, além disto, grande parte dos aparelhos elétrico-eletrônicos é projetada para funcionarem ligados a corrente alternada devido as facilidades de transporte que esta maneira proporciona. Assim, nos sistemas em que se usam geradores de corrente contínua, é necessário que se tenha ligado juntamente ao sistema um inversor para que se possam utilizar diretamente aparelhos elétricos.

Já os geradores de corrente alternada (AC), geram a eletricidade na forma de corrente alternada e pode ser usado diretamente nos aparelhos elétricos e eletrônicos do dia a dia.

Existe, porém dois inconvenientes neste tipo de produção de eletricidade: o primeiro é que não se é possível estocar energia na forma de corrente alternada; o segundo inconveniente é que os geradores de corrente alternada geram correntes em freqüências que variam com a velocidade de giro do rotor, e como os ventos variam muito, as freqüências geradas pelo gerador também variam bastante.

2.2.6.4 – Mecanismos de Controle

Os mecanismos de controle destinam-se à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controle de carga, etc. Pela variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga).

Devido à atuação das forças aerodinâmicas nas pás do rotor, uma turbina eólica converte a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional. Estas forças aerodinâmicas são geradas ao longo das pás do rotor que necessitam de perfis especialmente projetados e que são muito similares àqueles usados para asas de aviões. Com a velocidade do fluxo de ar aumentando, as forças de sustentação aerodinâmica aumentam com a segunda potência e a energia extraída da turbina com a terceira potência da velocidade do vento, uma situação que necessita de um controle de potência do rotor muito efetivo e rápido de modo a evitar sobrecarregamento elétrico e mecânico no sistema de transmissão.

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência a potência nominal do aerogerador. São chamados de controle estol (*stall*) e controle de passo (*pitch*).

Controle Estol

O controle estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descole da superfície da pá (estol), reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto.

Sob todas as condições de ventos, superiores à velocidade nominal, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é, parcialmente descolado da superfície produzindo menores forças de sustentação e elevadas forças de arrasto. O que atua contra um aumento da potência do rotor.

Para evitar que o efeito estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito.



Figura 21 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil da pá eólica

Turbinas com controle estol são mais simples do que as de controle de passo porque elas não necessitam de um sistema de mudança de passo. Os aerogeradores com controle estol, em comparação com os aerogeradores com controle de passo possuem, em princípio, as seguintes vantagens:

- Inexistência de sistema de controle de passo;
- Estrutura de cubo do rotor simples;
- Menor manutenção devido a um número menor de peças móveis;

Controle de Passo

O controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do controlador do sistema. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal. Ou seja, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência.

Para todas as velocidades do vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que a turbina produza apenas a potência nominal. Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície produzindo sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto.



Figura 22 - Fluxo aderente ao perfil da pá eólica

Turbinas com controle de passo são mais sofisticadas do que as de passo fixo, controladas por estol. Porque estas necessitam de um sistema de variação de passo. Por outro lado, elas possuem certas vantagens:

- Permitem controle de potência ativo sob todas as condições de vento, também sob potências parciais;
- Alcançam à potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas);
- Maior produção de energia sob as mesmas condições (sem diminuição da eficiência na adaptação ao estol da pá);
- Partida simples do rotor pela mudança do passo;
- Fortes freios desnecessários para paradas de emergência do rotor;
- Cargas das pás do rotor decrescentes com ventos aumentando acima da potência nominal;
- Massas das pás do rotor menores levam a menores massas dos aerogeradores.

2.2.6.5 – Torre

As torres são necessárias para sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema. Em geral, as torres são fabricadas de metal (treliça ou tubular) ou de concreto e podem ser ou não sustentadas por cabos tensores.

3.0 – Material e Métodos

3.1 – Caracterização do local de Instalação do Projeto

A pesquisa foi desenvolvida na comunidade Poleiros, zona rural do município de Barra de Santa Rosa – PB, latitude de 6° 43' S, longitude de 36° 3' W, e altitude de 457 m, localizada na região do Curimataú paraibano, distante aproximadamente 120 km da capital do estado João Pessoa.

É uma região que apresenta clima típico de semi-árido, baixos índices pluviométrica, da ordem de 400 mm anuais; altitudes entre 400 a 500 m.

Segundo Atlas Solarimétrico do Brasil, desenvolvido por iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB, a região de Barra de Santa Rosa está localizada em uma região que apresenta um período médio de insolação diária de 8 horas ao longo do ano.

E que de acordo com o Atlas de Irradiação Solar no Brasil, elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e pelo Laboratório de Energia Solar – LABSOLAR, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, nesta parte do país incide uma taxa de irradiação média de 20 MJ/m²/dia ao ano.

3.2 – Dados Solarimétricos Locais

Os dados sobre insolação e taxas de irradiação local foram fornecidos pelo Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA, da Universidade Federal de Campina Grande. As informações se referem ao período de 1974 a 1994, no caso da insolação, e de 1974 a 1995, para as taxas de irradiação.

Tabela 2 – Médias Mensais do tempo diário de Insolação Global em Barra de Santa Rosa, no período de 1974 a 1994

Fonte: Departamento de Ciências Atmosféricas da UFCG

Insolação Global – Média Mensal (horas)												
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1974	-	-	-	-	-	-	-	7,8	7,3	7,9	8,3	8,5
1975	8,1	7,8	7,1	7,6	5,7	6,7	4,9	6,7	8,4	8,7	8,6	7,5
1976	8,6	7,3	6,1	8,0	7,4	6,4	6,5	8,5	8,1	6,0	9,5	9,0
1977	5,2	8,0	7,7	5,5	6,2	3,5	5,2	7,7	8,1	8,8	9,0	-
1978	8,2	5,7	5,6	6,1	5,8	7,0	5,4	7,2	7,5	8,5	-	7,8
1979	8,8	7,7	8,4	7,3	5,3	4,9	6,9	6,7	7,1	9,0	7,5	8,6
1980	6,9	5,5	7,0	7,1	6,3	6,4	6,2	7,5	8,3	7,9	7,8	8,7
1981	6,5	7,6	4,8	7,4	5,7	6,9	6,6	6,8	7,5	8,9	8,0	6,1
1982	7,8	6,7	7,5	6,6	5,9	5,5	4,4	6,1	7,4	8,7	8,8	7,6
1983	7,9	6,1	6,8	8,1	6,1	7,1	7,3	6,4	8,4	8,6	9,6	8,4
1984	7,1	8,2	7,1	4,6	3,9	6,1	-	4,4	7,7	8,0	9,5	9,7
1985	6,9	5,8	4,9	4,6	5,5	6,1	4,5	6,4	7,0	9,3	7,4	4,6
1986	6,5	6,8	5,2	5,6	6,4	5,2	5,6	5,6	5,8	8,1	7,0	8,1
1987	8,1	8,0	5,4	6,3	8,2	5,2	5,9	8,0	7,9	9,1	9,1	9,1
1988	8,3	7,1	7,1	5,9	5,3	4,9	4,6	6,3	7,5	8,5	7,6	6,9
1989	7,5	7,6	7,4	4,8	6,3	5,6	4,8	6,0	7,9	8,1	7,1	4,1
1990	7,5	6,4	8,2	6,7	7,3	6,6	6,7	6,6	8,7	8,4	7,6	8,1
1991	6,6	6,5	6,0	7,4	4,8	6,3	5,2	6,0	7,0	6,4	7,6	8,6
1992	7,3	-	-	5,5	6,5	4,6	6,0	5,7	5,4	8,4	8,3	7,3
1993	6,0	8,0	7,0	5,9	6,6	5,8	6,8	7,6	7,6	7,7	6,9	7,7
1994	6,7	7,0	5,0	6,0	6,1	3,7	5,7	-	-	-	-	6,4
Méd	7,3	7,0	6,5	6,3	6,1	5,7	5,7	6,7	7,5	8,3	8,2	7,6

Tabela 3 – Médias Mensais das Taxas de Irradiação Global em Barra de Santa Rosa, no período de 1974 a 1995

Fonte: Departamento de Ciências Atmosféricas da UFCG

Irradiação Global – Média Mensal (MJ/m ² dia)												
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1974	-	-	-	-	-	-	-	18,9	20,1	21,8	20,4	19,9
1975	19,5	19,5	17,5	17,3	15,1	15,0	13,1	16,3	19,6	20,6	21,2	19,7
1976	20,7	20,7	18,9	20,6	17,2	15,9	15,8	19,4	19,3	18,8	21,2	20,6
1977	16,0	19,2	19,9	12,6	16,2	10,4	13,8	17,0	18,2	19,9	19,9	17,9
1978	19,9	21,3	18,6	17,3	15,8	15,6	14,5	16,9	18,1	19,4	20,4	18,9
1979	19,0	18,4	20,1	17,7	14,6	14,1	16,7	17,8	18,6	21,7	20,6	21,8
1980	17,6	17,6	17,7	17,3	15,6	15,4	16,6	17,3	19,6	19,9	18,8	18,8
1981	16,4	17,7	16,6	19,4	15,8	14,7	16,1	16,6	18,4	20,8	19,2	16,8
1982	17,9	18,1	19,6	17,5	15,7	14,3	12,1	15,4	18,6	21,3	20,1	18,3
1983	18,6	19,4	17,8	19,6	15,8	16,0	16,9	16,2	19,7	-	-	-
1984	-	-	-	-	15,4	16,8	16,0	16,4	19,5	19,9	21,2	21,5
1985	-	17,2	17,4	14,9	15,5	15,1	13,6	16,4	17,7	20,6	19,5	17,0
1986	16,9	18,8	17,8	16,4	16,4	13,8	14,1	16,4	15,4	20,0	16,5	17,8
1987	18,5	19,3	16,3	16,9	17,5	14,1	14,5	17,0	18,2	21,2	19,8	19,6
1988	18,6	18,8	19,9	17,2	15,5	14,7	13,8	16,2	17,8	20,5	20,0	19,0
1989	19,3	19,9	19,0	15,5	16,6	14,1	13,7	16,1	18,0	-	-	-
1990	-	17,8	18,1	15,5	15,4	13,3	14,0	14,4	17,0	19,3	18,4	19,6
1991	20,1	20,0	20,0	20,9	13,0	14,3	12,8	14,7	13,7	17,6	16,6	19,5
1992	16,3	16,8	17,3	15,9	15,1	12,5	14,5	14,3	15,4	22,6	-	-
1993	-	20,0	19,5	16,5	15,4	13,5	14,8	17,6	17,0	19,1	18,7	19,3
1994	16,8	17,3	13,8	13,7	12,0	8,5	9,8	15,4	17,1	17,5	-	14,9
1995	20,1	18,7	19,2	15,6	14,1	10,7	11,7	14,4	14,6	18,0	14,6	17,2
Méd	18,4	18,8	18,2	16,9	15,4	13,9	14,2	16,4	17,8	20,0	19,3	18,8

3.3 – Principais Equipamentos Seleccionados para o Projeto:

- Aerogerador GERAR 246, ENERSUD

Características Técnicas:

O GERAR 246 possui um alto rendimento aerodinâmico e alcança até 300 watts de potência. Pesando apenas 25 kg e com 2,46 m de diâmetro, este equipamento foi projetado para captar energia a baixíssimas velocidades de vento, a partir de 3 m/s.

Diâmetro da Hélice	2,46 m
Potência a 12,5m/s	1000 w
Potência a 16m/s	1150 w
Número de Pás	3
Tipo de Pás	Torcida, (5 aerofólios)
Velocidade de Partida	2,0 m/s
Torque de Partida	0,3 Nm
Controle	Active Stall
Proteção contra Altas Velocidades	Controle de Passo Sincronizado
Sistema Magnético	Neodímio (ímã permanente)
Sistema Elétrico	Trifásico
Tensão de Saída	24/48 V
Topologia	Fluxo Axial
Peso Total (alternador+hélice+cab. Rot)	28 kg
Material Anti Corrosão quente	Alumínio/Inox/Galvanização a quente

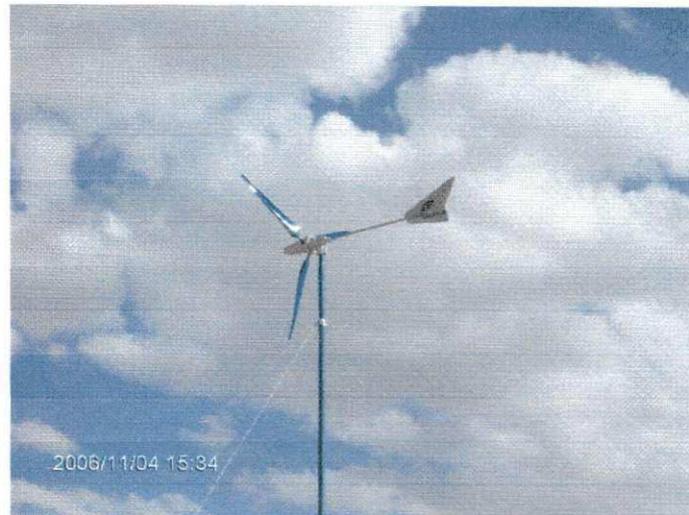


Figura 23 – Aerogerador GERAR246

➤ Controlador de Carga Eólico

Principais Funções:

Controle de Carga de Baterias	
Proteção para Alta/ Baixa tensão das Baterias	
Tensão de Saída	24/ 48 volts
Indicador de Carga	Sinalização Luminosa



Figura 24 – Curva de Potência do Controlador de carga

➤ Inversor Senóide Pura eólico, marca SUNLAB – LÁBRAMO CENTRONICS.

Características Técnicas:

Tensão de corrente contínua	24 volts
Tensão de corrente alternada	220 volts
Frequência	60 Hz
Potência	1500 watts

➤ Torre Eólica de 12 m de altura, feita com tubo de ferro Ø 3".

➤ Painel Fotovoltaico (Wurth)

Quantidade = 15

Características Técnicas:

Tensão de corrente contínua	24 volts
Potência de Pico	100 watts
Dimensões	65 x 113 cm

➤ Controlador de carga fotovoltaico (Wurth)

Características Técnicas e quantidade:

Tensão de corrente contínua	24 volts
Corrente elétrica	50 A

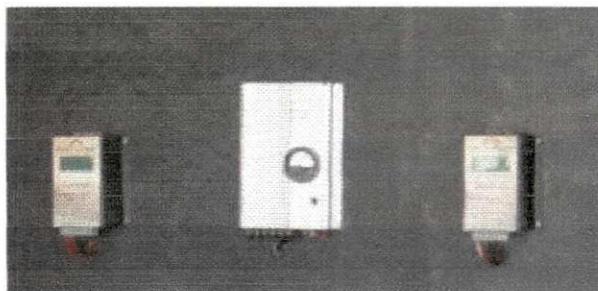


Figura 25 – Fotografia dos dois controladores de carga fotovoltaicos, e do controlador de carga eólico

➤ Inversor Senóide Modificada

Características Técnicas:

Tensão de corrente contínua	24 volts
Tensão de corrente alternada	220 volts
Frequência	60 Hz
Potência	1500 watts



Figura 26 – Inversor de senóide modificada

- Bateria Estacionária, Marca AC Delco Freedom DF3000

Quantidade = 10

Características Técnicas:

Tensão	12 volts
Capacidade	220 Ah
Composição	NiCd/NiMb

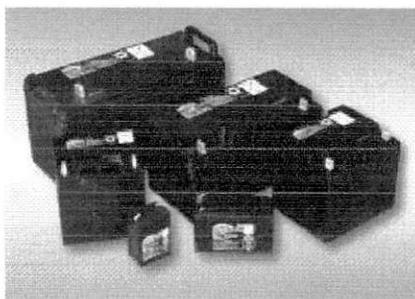


Figura 27 - Baterias

3.4 – Montagem dos Sistemas Eólico e Fotovoltaico:

O conjunto formado pelos 15 painéis fotovoltaicos foi montado em cima da casa de controle e instalações dos equipamentos (baterias, controladores de carga, etc.), apoiado em canaletas de ferro, perfil em "U".

Esta escolha foi adotada como medida de precaução. Pois a instalação dos painéis sobre cavaletes, proporciona riscos de danificação, sobretudo na zona rural, onde há a presença de animais.

A disposição dos painéis para formar o conjunto fotovoltaico se deu em paralelo no formato 3 por 5, ou seja, três linhas de cinco. Com a ligação sendo efetuada em série.

O conjunto fotovoltaico foi instalado com uma inclinação de 13,7 °, direcionados para o norte, conforme especificações do fornecedor (Würth), para as coordenadas locais (6° 43 ' S).

Para a vedação dos espaços entre os painéis foi utilizado silicone.

A casa de controle e instalações dos equipamentos tem uma área de 3,30 x 4,25 m, pé-direito variável de 2,40 a 3,50 m. É protegida por uma cerca formada por estacas de cimento, contendo 16 linhas de arame farpado.

A torre eólica foi posicionada próxima à casa de controle, e que para a sua montagem foram usados os seguintes componentes:

- ✓ Tubo de ferro Ø 3";
- ✓ Cabos de aço de estaiamento: Ø 3/16";
- ✓ Anilhas;
- ✓ Clipes;

- ✓ Esticadores;
- ✓ Grampos de ancoragem;
- ✓ Suporte de base, medindo 40 x 40 cm em chapa galvanizada de 4,2 mm;
- ✓ Armação para ancoragem 30 x 30 x70 cm com parafuso de ¾";
- ✓ Braçadeiras em alumínio fundido;
- ✓ Braçadeira em chapa galvanizada para fixação dos cabos de aço.



Figura 28 – Vista Frontal do Conjunto de Painéis Fotovoltaicos



Figura 29 – Ligação dos Painéis Fotovoltaicos em Série



Figura 30 – Instalação da Torre Eólica



Figura 31 – Visão Geral dos Sistemas Eólico e Fotovoltaico

4.0 – Resultados e Discussão

4.1 - Monitoramento das condições do vento:

Os dados foram coletados na Comunidade Poleiros nas coordenadas: latitude de S 06° 43' 472" Sul, longitude de W 36° 07' 161" , a uma altitude de 457 m.

Foi montada uma torre de 12 m de altura, onde foram instalados um anemômetro e uma estação meteorológica equipada com sensores sem fio alimentados por células solares – Modelo WMR 928, e software coletor de dados – Modelo Oregon Scientific WRM 928.

O período de monitoramento dos dados ocorreu de 11/07/2005 a 29/10/2005.

Os resultados apontaram para uma velocidade média de 5,9 m/s, ou 21,2 Km/h a 146 ° sudeste. E a maior velocidade registrada foi de 12,3 m/s a 157 ° sudeste, verificada em 24/08/2005 às 15h45min.

Foi constatado que há períodos durante o dia com completa ausência de vento, no entanto, no período noturno obtivemos registros de velocidades variando de 6,5 a 8,7 m/s.

4.2 – Funcionamento dos sistemas Eólico e Fotovoltaico

A implantação da mini-usina eólico-fotovoltaica tem capacidade para a geração de uma potência de 2,5 kW de energia.

O efeito fotovoltaico que ocorre nos painéis, gera uma corrente contínua DC total de 60 A (4 A/ painel), e uma tensão de 24 volts. Esta corrente chega então a um barramento de cobre, que a distribui adequadamente em 2 controladores de cargas com capacidade de 50 A cada. Em seguida, o banco formado pelas 10 baterias passa a ser carregado com esta energia.

No caso da geração eólica, a corrente produzida pelo aerogerador é alternada AC (sistema trifásico). Esta segue ao controlador de carga de 30 A, para em seguida alimentar o banco de baterias supra citado.

A carga armazenada nas baterias passa por um processo de inversão de corrente contínua para corrente alternada, realizado pelo inversor senóide pura, e pelo inversor senóide modificada. Permitindo assim o uso da energia em quaisquer equipamentos.

A energia alternativa finalmente é acionada automaticamente pelo PLC – Programmable Controller System (Siemens), para a movimentação dos aeradores (3/4 CV cada) dos tanques de camarão. Através de uma programação pré-determinada, transmitida ao PLC por um *laptop*.

Esta programação consiste em se determinar quais dos 8 aeradores devem funcionar com energia alternativa e quais devem utilizar a energia convencional (CELB), durante certo período de tempo, em esquema de revezamento.

A indicação de qual tipo de energia os aeradores estão utilizando é verificada de acordo com a cor da luz acesa do lado de fora do painel do PLC. Onde, luz verde significa energia alternativa e luz vermelha indica energia convencional.



*Figura 32 - Quadro do PLC -
Programmable Controller System
(Siemens)*

5.0 – Conclusões

A análise das informações obtidas através do monitoramento das condições dos ventos mostrou que a localidade apresenta bom potencial para geração de eletricidade por meio eólico. E também que durante o período de coleta dos dados pelo anemômetro, a média das velocidades se apresentou em torno de 6 m/s a 150 ° sudeste.

A implantação do sistema eólico-fotovoltaico utilizado para acionar os aeradores dos tanques de camarões, diversificou o fornecimento de energia elétrica ao projeto PCHS. E mais, diminuiu os riscos de ocorrência de uma interrupção do abastecimento, contribuindo assim para que não haja perdas devido à morte dos camarões em razão de falta de oxigenação da água dos tanques.

O alto custo do sistema eólico-fotovoltaico está além das possibilidades financeiras da imensa maioria dos moradores da zona rural, principalmente das regiões Norte e Nordeste do Brasil. Contudo comunidades organizadas em cooperativas e desenvolvendo atividades que levem ao desenvolvimento social e econômico da região em que estão inseridas, poderão através de órgãos gestores, obter financiamento de modo a consolidar esses projetos.

6.0 – Referências Bibliográficas

- ✓ Barbosa E. M. de S., Fraidenaich, N., Fraga, A. N. S. and Tiba, C., "Photovoltaic Electrification - Social and Technical Diagnostic of Systems Installed in the Northeast of Brasil after one Operating year", Proc. 13 th European C. Photovoltaic Solar Energy Conference, pp 1088 - 1091, Nice - France, Oct - 1995;
- ✓ Zilles R., Fagá M. T. W. e Fedrizzi M. C. "Programa Nacional Para o Desenvolvimento da Energia Solar Fotovoltaica", Documento Preliminar apresentado no III Encontro para o Desenvolvimento das Energias Solar, Eólica e de Biomassa no Brasil. São Paulo - Brasil, Jun - 1996;
- ✓ Maycock, P.D., PV - News, vol. 23, nº 4, feb/2004;
- ✓ Martins J. M. de V. "Uma Análise da Confiabilidade de Sistemas de Conversão Fotovoltaica", 5ª Conferência Regional da IUAPPA, São Paulo, Brasil, 28/fev a 4/mar, 1994;
- ✓ Grossi H. G. "A Importância da Solarimetria para Projetos Solares" Notas de Aula do III Curso de Energia, Solar Solarimetria e Estatística da Radiação Solar, Recife, Brasil, 6 - 10 de nov 1995;
- ✓ Fraidenaich N. e Lyra F. Energia Solar - Fundamentos e Tecnologia de Conversão Heliotermoelétrica e Fotovoltaica. Recife - PE, Ed. Universitária da UFPE, 1995;
- ✓ Cometta E. Energia Solar: Utilização e Empregos Práticos, Hemus livraria editora limitada, Brasil, 1978;
- ✓ CARVALHO P. A., ESTANQUEIRO A. I., FEITOSA E. A., PEREIRA A. L. *Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas - Volume 1 - Projeto Elétrico e Impacto de Centrais Eólicas na Rede Elétrica*. Recife, 2003;
- ✓ TOLMASQUIM, M. T., 2003, *Fontes Renováveis de Energia no Brasil*, CENERGIA, Brasil, Editora Interciência;
- ✓ COLLE, S., RUTHER, R., MESQUITA, L., et al., 2000, *Fontes não-convencionais de energia - as tecnologias solar, eólica e de biomassa*. 3 ed. Florianópolis, UFSC/Labsolar/NCTS;
- ✓ FEITOSA, E.A.N., PEREIRA, A.L., SILVA, G.R, et al., 2002, *Panorama do Potencial Eólico no Brasil*, Projeto BRA/00/29: Capacitação do Setor Elétrico Brasileiro em Relação à Mudanças Global do Clima, ANEEL, Brasília, Brasil, Dupligráfica;
- ✓ Agência Nacional de Energia Elétrica, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 1ª ed., Brasília, Brasil, 2002, disponível em: <http://www.aneel.gov.br>;
- ✓ Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - CRESESB, de endereço: www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar.