

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE UM SISTEMA DE ENERGIA ALTERNATIVA RESIDENCIAL

Alexandre Anghinoni
Marcelo Mandes Taveira Franco

São Paulo
2004

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE UM SISTEMA DE ENERGIA ALTERNATIVA RESIDENCIAL

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Alexandre Anghinoni
Marcelo Mandes Taveira Franco

Orientador: Demétrio Cornílios Zachariadis

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2004

RESUMO

O presente trabalho visa o estudo, desenvolvimento e projeto de um sistema de geração de energia à partir de painéis fotovoltaicos e uma turbina aerogeradora. O sistema projetado tem como foco uma residência com quatro pessoas, sendo que o consumo de energia foi estimado à partir de pesquisas realizadas pelos autores. Dada a extensão do Brasil e as diferenças geográficas encontradas no país, o texto objetiva o projeto do sistema para a região sudeste, mais precisamente a cidade de São Paulo. Após reunião de todos os dados necessários, é feita uma análise de custo do sistema, bem como a otimização dos equipamentos utilizados visando aumento de rendimento e redução de custos. Uma comparação destes custos é então feita com o custo da energia elétrica disponível nas concessionárias e ainda com outro sistema disponível no mercado: o gerador de energia à diesel. Ao final do texto são apresentadas as conclusões do trabalho, com uma análise dos pontos positivos e negativos do projeto, bem como uma crítica sobre a má utilização do potencial eólico e solar no Brasil.

ABSTRACT

The aim of this report is the study, development and design of a power generation system using photovoltaic plates and a wind turbine generator. The system must attend a residence of four people. The energy consumption was estimated by the authors in order to deliver the exact energy needed. Due to the large extension of the Brazilian territory and the geographic differences found throughout the country, this paper proposes designing the system for use in the southeast area, more precisely in the city of São Paulo. With all the data and technical information gathered, costs analysis are made in order to maximize system performance and reduce the investment. A cost comparison is then made with the regular electric energy and diesel generators. The work ends presenting conclusions which point the positive and negative aspects of the project, also showing a critical view as to the indifference concerning the use of solar and wind energy in Brazil.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	09
2. Estimativa de Consumo.....	10
3. Energia Eólica.....	12
3.1. O recurso eólico.....	12
3.2.1. Componentes e funcionamento.....	14
3.2.2. Rendimento de um sistema eólico.....	18
3.3. Projeto e instalação do sistema eólico.....	19
4. Energia Solar.....	26
4.1. O recurso solar.....	26
4.2. Energia Solar Fototérmica.....	26
4.3. Energia Solar Fotovoltaica.....	27
4.4.1. Radiação Solar.....	28
4.4.2. Radiação Solar: Captação e Conversão.....	28
4.4.3. Radiação ao nível do Solo.....	30
4.5.1. Efeito térmico: componentes.....	32
4.5.2. Aquecimento da água.....	33
4.5.3. Circulação da água.....	33
4.5.4. Disposição do boiler.....	34
4.5.5. Escolha do posicionamento da instalação.....	35
4.5.6. Inclinação dos coletores.....	36
4.6.1. Efeito fotovoltaico: introdução.....	36
4.6.2. Componentes do sistema fotovoltaico.....	39
4.6.3. Tipos de célula.....	39
4.6.4. Módulos fotovoltaicos.....	42
4.6.5. Características elétricas dos módulos fotovoltaicos.....	44
4.6.6. Fatores que afetam as características elétricas dos módulos.....	46
4.6.7. O sistema fotovoltaico.....	46
4.6.8. Sistemas isolados.....	47
4.6.9. Sistemas híbridos.....	48
4.7. Projeto e dimensionamento do sistema de geração solar.....	49
5. Acessórios.....	56
6. Viabilidade econômica.....	57
7. Sistemas com geradores.....	59
8. Conclusões e análises.....	65
9. Revisão Bibliográfica.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo mensal dos aparelhos eletrodomésticos	10
Tabela 2 – Matriz de decisão do sistema eólico a ser utilizado	21
Tabela 3 - Latitudes de algumas Cidades Brasileiras e a Inclinação dos Coletores	36
Tabela 4 – Preços de painéis fotovoltaicos	50
Tabela 5 – Custos de sistemas de aquecimento de água térmico	52
Tabela 6 – Matriz de decisão entre os sistemas apresentados.....	55
Tabela 7 – Matriz de decisão do sistema eólico a ser utilizado	62
Tabela 8 – Matriz de decisão dos painéis.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Apresentação das diversas partes constituintes de um sistema eólico.	17
Figura 2 - Foto do aerogerador Whisper 175 EZ Wire utilizado no projeto.	22
Figura 3 - Distribuição de velocidades do vento para o período de Outubro a Dezembro.	24
Figura 4 - Distribuição de velocidades do vento para o período de Janeiro a Março.	24
Figura 5 - Distribuição de velocidades do vento para o período de Julho a Setembro.	25
Figura 6 - Distribuição de velocidades do vento para o período de Abril a Junho.	25
Figura 7 - Órbita da Terra, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de $23,5^{\circ}$	29
Figura 8 - Distribuição espectral da radiação solar	30
Figura 9 - Trajetória dos raios de sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM).....	31
Figura 10 - Esquema de construção de um coletor solar	32
Figura 11 - Instalação através do Sistema de Termosifão.....	34
Figura 12 - Instalação de um <i>Boiler</i> de Nível	35
Figura 13 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	37
Figura 14 - Efeito fotovoltaico na junção <i>pn</i>	38
Figura 15 - Célula de silício monocristalino e policristalino, respectivamente	41
Figura 16 - Conexão de células em paralelo	42
Figura 17 - Arranjo das células em série	43
Figura 18 - Possível ligação para um diodo bypass entre células	43
Figura 19 - Diodo de bloqueio.....	44
Figura 20 - Curvas característica $I \times V$ e curva da potência pela tensão, respectivamente...	45
Figura 21 - Parâmetros de potência máxima	45
Figura 22 - Efeito causado pela variação da intensidade luminosa e pela temperatura na célula, respectivamente	46
Figura 23 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico	47
Figura 24 - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada	48
Figura 25 - Exemplo de sistema híbrido.....	49

1. Introdução

Este trabalho tem como meta desenvolver e apresentar o projeto de uma residência que seja auto-suficiente energeticamente, tendo como fontes de energia as energias solar e eólica. Desta forma, este relatório irá apresentar as características, custos e especificações do sistema a ser utilizado, bem como do local onde este será instalado.

Definiu-se ainda que o projeto é para a cidade de São Paulo, tendo como consumo médio a taxa de 780 kWh/mês. Esta necessidade de fornecimento é dividida em partes aproximadamente iguais entre os dois componentes do sistema, de modo que nenhum deles predomine em relação ao outro.

2. Estimativa de consumo

A seguir é mostrada uma tabela com a estimativa de consumo de uma residência de classe média na cidade de São Paulo.

Tabela 1 - Consumo mensal dos aparelhos eletrodomésticos

Aparelho	Potência (W)	Potência Média Considerada (W)	Tempo de uso horas/mês *	Consumo Mensal (kWh)**
Aparelho de som	200 a 300	200	30	6
Aspirador	1000	1000	4	4
Batedeira	100 a 300	150	10	1,5
Cafeteira	1000	1000	10	10
Chuveiro	4000 a 6500	4500	60	270
Ar Condicionado 7000 Btu/h	900	900	45	40,5
Computador e impressora	200 a 250	200	30	6
Enceradeira	500	500	4	2
Freezer	350 a 500	400	300	120
Ferro de passar	800 a 1600	1000	8	8
Geladeira 1 porta	200	200	300	60
Torneira elétrica	2500 a 3500	3500	5	17,5
Lavadora de pratos	1200 a 2000	1500	15	22,5
Lavadora de roupas	1500	1500	10	15
06 Lâmpadas	60 cada	60 cada	90 cada	32,4

Incandescentes				
06 Lâmpadas Incandescentes	100 cada	100 cada	90 cada	54
Microondas	1200 a 1300	1300	15	19,5
Liquidificador	150	150	10	1,5
Secador de Cabelo	500 a 1200	1000	8	8
Secadora de roupa	1000 a 3500	3500	15	52,5
TV 14"	60	60	90	5,4
TV 20"	90	90	90	8,1
TV 29"	120	120	90	10,8
Torradeira	500 a 1200	1200	5	6
Ventilador portátil	60 a 100	100	30	3
Vídeocassete	80 a 100	100	5	0,5

Da tabela pode-se notar que com um consumo de aproximadamente 784,7 kWh/mês é possível suprir energeticamente uma residência sem grandes restrições de consumo.

3. Energia Eólica

3.1. O recurso eólico

A energia eólica provém da radiação solar uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. 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 é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

De uma forma geral, os movimentos das massas de ar na atmosfera (ventos) processam-se em regime turbulento. Sendo assim, a velocidade instantânea do vento é descrita simplificada como um valor médio acrescido de um desvio a partir da média (flutuação), tal que:

$$V = V_m + v'$$

onde V_m é a velocidade média do vento e v' é a flutuação. Na prática, para algumas aplicações, leva-se em consideração apenas a intensidade da velocidade média V_m . A maioria dos instrumentos de medição, devido a sua configuração, "filtra" as flutuações e fornece somente o valor da velocidade média.

A direção do vento também é um importante parâmetro a ser analisado, pois mudanças de direção freqüentes indicam situações de rajadas de vento. Além disso, a medida da direção do vento auxilia na determinação da localização das turbinas no projeto. Devido à existência do problema de "sombra", isto é, de interferência das esteiras das turbinas, é fundamental o conhecimento da direção predominante.

Do ponto de vista do aproveitamento da energia eólica, é importante distinguir os vários tipos de variações temporais da velocidade dos ventos. Entre essas variações as mais importantes são:

Variações Anuais - Para se obter um bom conhecimento do regime dos ventos não é suficiente basear-se na análise de dados de vento de apenas um ano; o ideal é dispor de dados referentes a vários anos. À medida que uma maior quantidade de dados anuais é coletada, as características levantadas do regime local dos ventos tornam-se mais confiáveis.

Variações Sazonais - O aquecimento não uniforme da superfície terrestre resulta em significativas variações no regime dos ventos, resultando na existência de diferentes estações do ano. Considerando-se que uma pequena variação na velocidade dos ventos implica numa grande variação de potência (relação cúbica entre a potência disponível e a velocidade do vento na altura do eixo da turbina), a utilização de médias anuais, ao invés de médias sazonais, pode levar a resultados que se afastam da realidade.

Variações Diárias - As variações diárias na velocidade do vento (brisas marítimas e terrestres, por exemplo) também são causadas pelo aquecimento não uniforme da superfície da Terra. Essas variações são importantes quando, após a escolha de uma região, procura-se o local mais adequado para a instalação do sistema eólico dentro dessa área. Ao comparar-se a evolução da velocidade média ao longo do dia percebe-se que há uma significativa variação de um mês para os outros. Com esse tipo de informação pode-se projetar melhor o sistema eólico. Por exemplo, nos locais em que os ventos no período do dia são mais fortes do que os do período da noite, e a carga de pico ocorre durante o dia, a carga base pode ser fornecida pelo sistema eólico. Entretanto, se a carga de pico ocorre durante a noite, provavelmente a demanda será maior que o disponível e um sistema de estocagem pode se fazer necessário.

Variações de Curta Duração - As variações de curta duração estão associadas tanto às pequenas flutuações quanto às rajadas de vento. Num primeiro momento, essas variações não são consideradas na análise do potencial eólico de uma região, desde que não assumam grandes proporções. As flutuações e a turbulência do vento podem afetar a integridade estrutural do sistema eólico, devido à fadiga que ocorre especialmente nas pás da turbina. Por outro lado, as rajadas, caracterizadas por aumentos bruscos de curta duração da velocidade do vento, geralmente acompanhadas por mudanças de direção, merecem maior atenção.

3.2.1. Componentes e funcionamento

O princípio de funcionamento de uma máquina eólica baseia-se na conversão da energia cinética, que é resultante do movimento de rotação causado pela incidência do vento nas pás da máquina eólica. Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a propiciar um maior rendimento final. 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. Por ser o componente mais característico de um sistema eólico, sua configuração influenciará diretamente o rendimento global do sistema. Nele são fixadas as pás da turbina. Todo o conjunto é conectado a um eixo que transmite a rotação das pás para o gerador, muitas vezes através de uma caixa multiplicadora;
- **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. A Figura 2 apresenta a localização da caixa multiplicadora dentro do sistema de geração eólica.

O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador de forma a 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-se necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos.

Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construir turbinas eólicas. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, (necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores) utilizam-se geradores múltiplos de baixa velocidade e grandes dimensões.

Os dois tipos de projetos possuem vantagens e desvantagens e a decisão de utilizar o multiplicador ou fabricar um aerogerador sem caixa de transmissão é antes de tudo uma questão de filosofia do fabricante.

- **Gerador Elétrico:** Responsável pela conversão da energia mecânica de rotação em energia elétrica. Essa transformação, através de equipamentos de conversão eletromecânica é um problema tecnologicamente dominado e, portanto, encontram-se vários fabricantes de geradores disponíveis no mercado. Entretanto, a integração de geradores a sistemas de conversão eólica constitui-se em um grande problema, que envolve principalmente:

- variações na velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- variações do torque de entrada (uma vez que variações na velocidade do vento induzem variações de potência disponível no eixo);
- exigência de frequência e tensão constante na energia final produzida;

Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos e geradores de comutador com corrente alternada. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação a sistemas de conversão de energia eólica.

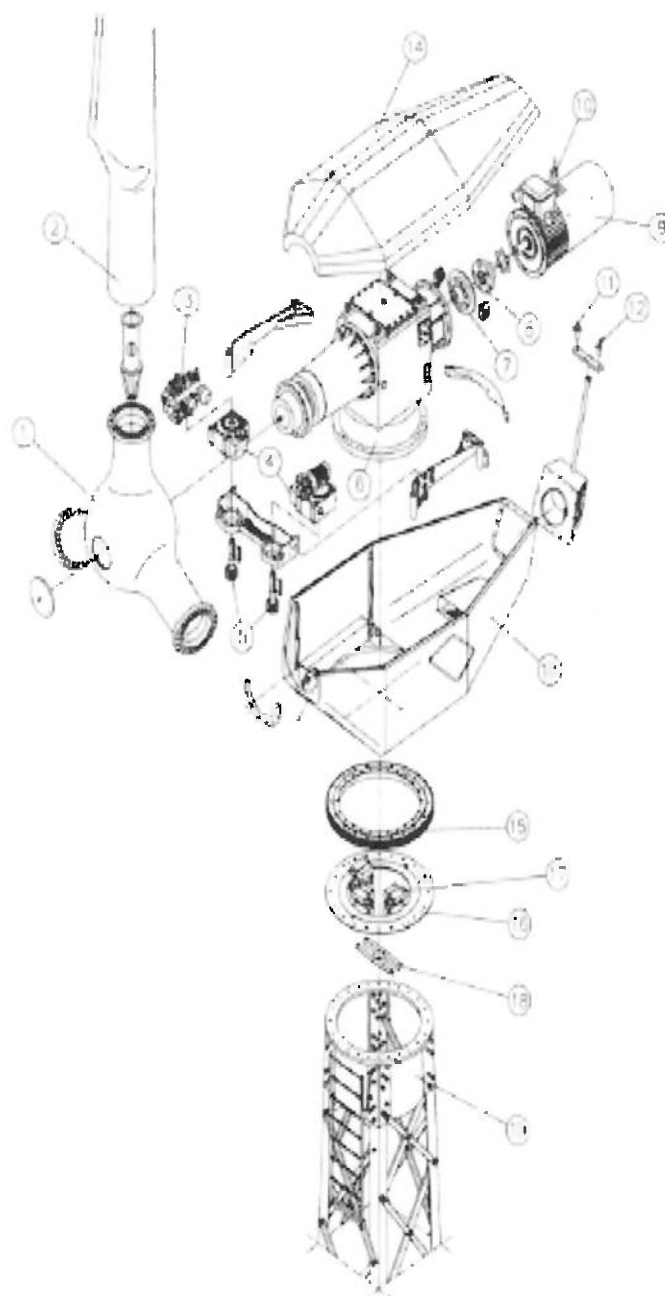
- **Mecanismos de Controle:** Responsáveis pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga, etc. Pela variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga).
- **Torre:** Responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente. Em geral, as torres são fabricadas de metal (treliçada ou tubular) ou de concreto. As

torres das turbinas eólicas de pequeno porte são estaiadas (sustentadas por cabos tensores) enquanto as das turbinas de médio e grande porte são auto-portantes.

- **Sistema de Armazenamento:** Responsável por armazenar a energia para produção de *energia firme* a partir de uma fonte intermitente. As formas mais conhecidas de armazenamento de energia eólica são através de baterias e sob a forma de energia potencial gravitacional.
- **Transformador:** Responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica.
- **Acessórios:** Englobam todos os itens periféricos essenciais ao bom funcionamento do sistema eólico. Incluem-se transmissões, freios, embreagens, eixos, acoplamentos e mancais.

Figura 1 - Apresentação das diversas partes constituintes de um sistema eólico.

- 1- Cubo do rotor
- 2- Pás do rotor
- 3- Sistema hidráulico
- 4- Sistema de posicionamento da nacelle
- 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- Nacelle, parte inferior
- 14- Nacelle, parte superior
- 15- Rolamento do posicionamento
- 16- Disco de freio do posicionamento
- 17- Pastilhas de freio
- 18- Suporte do cabo de força
- 19- Torre



3.2.2. Rendimento de um sistema eólico

O rendimento global do sistema eólico relaciona a potência disponível do vento com a potência final que é entregue pelo sistema. Os rotores eólicos ao extraírem a energia do vento reduzem a sua velocidade; ou seja, a velocidade do vento frontal ao rotor (velocidade não perturbada) é maior do que a velocidade do vento atrás do rotor (na esteira do rotor). Uma redução muito grande da velocidade do vento faz com que o ar circule em volta do rotor, ao invés de passar através dele.

A condição de máxima extração de energia verifica-se para uma velocidade na esteira do rotor 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 $0,593$. Em outras palavras, $59,3\%$ da energia contida no fluxo de ar pode ser teoricamente extraída por uma turbina eólica. Na prática, entretanto, o rendimento aerodinâmico das pás reduz ainda mais este valor. Para um sistema eólico, existem ainda outras perdas, relacionadas com cada componente (rotor, transmissão, caixa multiplicadora e gerador). Além disso, 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 uma 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) e diminui para velocidades diferentes desta.

Projetar um sistema eólico, para um determinado tamanho de rotor e para uma carga pré-fixada, supõe trabalhar no intervalo ótimo de rendimento do sistema com relação a curva de potência disponível do vento local. Isto requer encontrar uma relação de multiplicação, de maneira que se tenha um bom acoplamento rotor/carga. É necessário também, ter mecanismos de controle apropriados para melhorar o rendimento em outras velocidades de vento e aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico.

Um exemplo de mecanismo de controle é a utilização de rotores com ângulo de passo variável. Com este controle, à medida que a velocidade do vento varia, as pás mudam de posição, variando o rendimento do rotor. Com isto, pode-se aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico e ainda manter uma determinada velocidade de rotação, que corresponde à eficiência máxima do gerador.

Como aproximação, o rendimento global de um sistema eólico simples pode ser estimado em 30%.

3.3. Projeto e instalação do sistema eólico

Tanto no Brasil como no exterior, existem diversas empresas fornecedoras de máquinas de pequeno porte para aplicações em sistemas autônomos isolados, o que facilita o desenvolvimento do projeto em questão. Toda a instalação deve ser gerenciada de forma a se obter o melhor projeto possível. Isto inclui o planejamento e construção da base da torre, a instalação da torre, a instalação do aerogerador na torre, e por fim as instalações elétricas.

Para tanto é feito um estudo a fim de decidir qual sistema é o mais adequado para nosso projeto. Essa análise é feita a partir uma tabela de decisões, que tem como objetivo apontar qual a melhor opção. São levados em conta os diferentes fatores que pesam na decisão, tais como preço, potência produzida, espaço requerido para instalação e velocidade de partida. A seguir são mostradas as 4 opções de turbinas e suas principais características. Antes de se analisar as informações apresentadas, deve-se ter em mente que o sistema eólico será responsável pelo fornecimento de pelo menos 390 kWh/mês (ou seja, a metade do sistema final) para que o equipamento solar não seja sobrecarregado. Desta forma, caso o modelo de turbina não gere esta potência, deve-se comparar 2 ou mais turbinas iguais a ela com as demais.

Modelos*

2 X Bergey BWC XL.1 Wind Turbine:

Preço unidade: R\$ 5912,00

Potência produzida: 250 kWh/mês (regime de ventos de 5,4m/s).

Velocidade de partida: 3,0 m/s

Espaço requerido para instalação: área no solo = 214 m².

diâmetro do rotor = 2,50m.

altura da torre = 16m.

4 X Whisper H40 900w Ez-120-N 12-48v:

Preço unidade: R\$ 4796,00.

Potência produzida: 105 kWh/mês (regime de ventos de 5,4m/s).

Velocidade de partida: 3,4 m/s.

Espaço requerido para instalação: área no solo = 182 m².

diâmetro do rotor = 2,10m.

altura da torre = 15m.

2 X Whisper H80 1kw Ez-120 12-48v:

Preço unidade: R\$ 5462,00

Potência produzida: 193 kWh/mês (regime de ventos de 5,4m/s)

Velocidade de partida: 3,1 m/s

Espaço requerido para instalação: área no solo = 182 m².

diâmetro do rotor = 3,0m.

altura da torre = 15m.

1 X Whisper 175 EZ Wire I 24 volt:

Preço unidade: R\$ 12600,00.

Potência produzida: 341 kWh/mês (regime de ventos de 4,5m/s).

538 kWh/mês (regime de ventos de 5,4m/s).

Velocidade de partida: 3,4 m/s.

Espaço requerido para instalação: área no solo = 314 m².

diâmetro do rotor = 4,57m.

altura da torre = 17m.

* fonte: <http://www.altenergystore.com>

A partir desses dados, é montada a tabela de decisões atribuindo-se um peso para cada parâmetro de decisão. Assim é escolhida a melhor alternativa:

Tabela 2 – Matriz de decisão do sistema eólico a ser utilizado

	Potência (5)	Espaço (4)	Preço (3)	Velocidade de partida (2)	TOTAL
2 X Bergey BWC XL.1	4	2	4	5	50
4 X Whisper H40	3	1	1	3	28
2 X Whisper H80	2	2	5	4	41
1 X Whisper 175	5	3	3	3	52

O modelo escolhido pela matriz de decisão é a turbina **Whisper 175 EZ Wire I 24 volt**. O aerogerador em si conta com um leme que posiciona a hélice de frente para o vento, utilizando o máximo da disponibilidade energética. A rotação da hélice gira um alternador que produz eletricidade. Um cabo conecta o aerogerador ao controlador de carga das baterias (já presente no modelo). O controlador não deixa as baterias se sobrecarregarem, preservando-as para uma vida mais longa. A energia produzida é então armazenada nas baterias. Como as baterias fornecem energia em corrente contínua de 24 volts e os aparelhos em geral funcionam na faixa de 127 volts(60 Hz), utiliza-se um inversor. O inversor converte a tensão de 24 volts contínua para tensão alternada de 127 volts(60 Hz). No projeto utiliza-se um inversor da marca Prothons Soft-line **MOD. P-24 – 1500** com um custo de R\$ 3.500,00.

A quantidade de energia produzida depende diretamente da intensidade de vento no local. Com dados do fabricante do aerogerador em questão, verifica-se-se que com um regime de ventos médio de 3,65 m/s durante todo o dia (regime médio de ventos na USP, apresentado abaixo) não é possível gerar os 341 kWh/mês indicados (para isto é necessário um regime de ventos de 4,5 m/s). Desconsiderando a altura da torre indicada pelo fabricante (16m), será feito um estudo para se determinar a altura necessária para se obter a velocidade de ventos de 4,5 m/s.

SISTEMA WEBBEE

Instrumento :: 14

Período :: De 2003-07-01 00:00:00
Ate 2004-07-01 00:00:00

	MÉDIA	MÁX	MIN
Velocidade do Vento (m/s)	3.65	27.40	0

quantidade de registros :: 35599

Figura 2 - Foto do aerogerador Whisper 175 EZ Wire utilizado no projeto.



Utilizando-se dos dados obtidos junto ao CEPAGRI (Centro de Pesquisa da Agricultura) da UNICAMP e depois de filtrá-los, elaborou-se o perfil de velocidades do vento para o ano de 2003, divididos em quatro períodos de três meses cada, de Janeiro a Março, Abril a Junho, Julho a Setembro e de Outubro a Dezembro.

Tomando uma altura de estudo de 13 metros, ajustaram-se os dados de velocidades para esta altura a partir da Eq. (1) (Johansson, 1993).

$$v(x) = v(10) \cdot \left(\frac{h(x)}{h(10)} \right)^n \quad (1)$$

onde:

$v(x)$: velocidade do vento na altura desejada (m/s);

$v(10)$: velocidade do vento a 10 metros de altura (m/s);

$h(x)$: altura desejada (m);

$h(10)$: altura de 10 metros (m);

n : fator de rugosidade do solo.

Aplicando a fórmula para os dados de velocidade para uma altura de 5 metros e 10 metros, encontra-se o valor de n .

$$v(5) = v(10) \cdot \left(\frac{h(5)}{h(10)} \right)^n \Rightarrow 1,84 = 5,71 \cdot \left(\frac{5}{10} \right)^n \Rightarrow n = 1,6323 \quad (2)$$

Com o valor encontrado para n , determina-se a distribuição de velocidades para a altura em que será posicionado o aerogerador, de 13 metros.

Figura 3 – Distribuição de velocidades do vento para o período de Outubro a Dezembro.

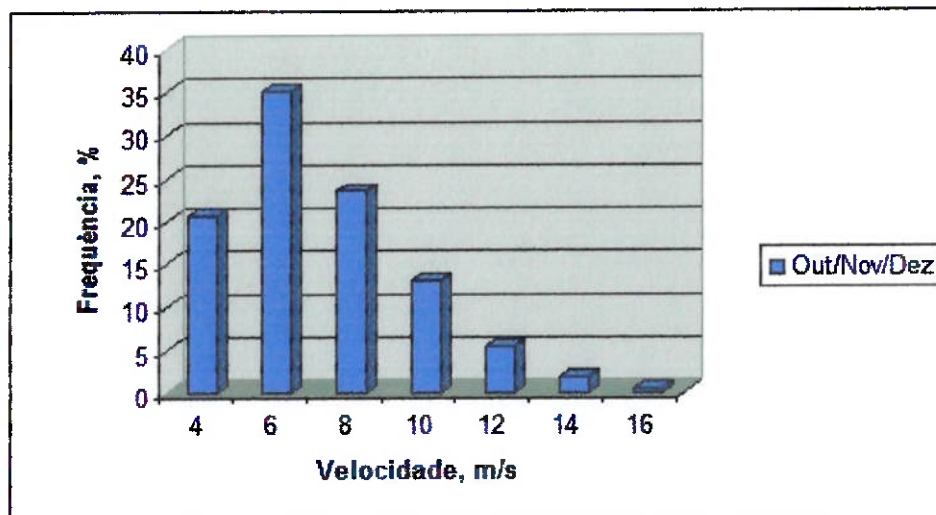


Figura 4 - Distribuição de velocidades do vento para o período de Janeiro a Março.

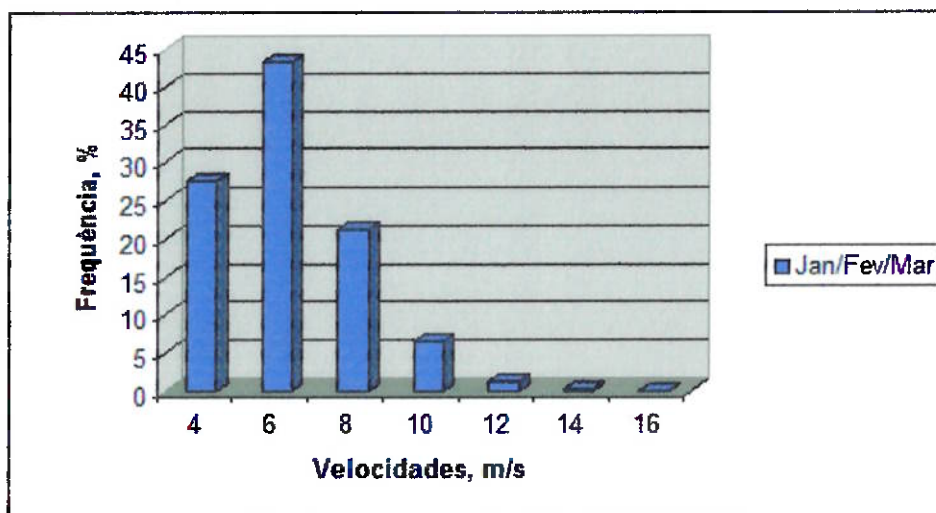


Figura 5 - Distribuição de velocidades do vento para o período de Julho a Setembro.

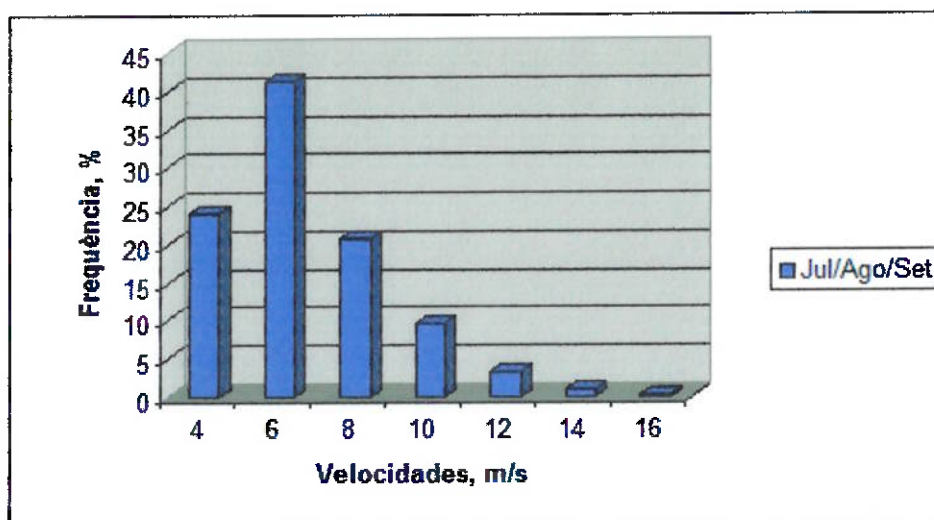
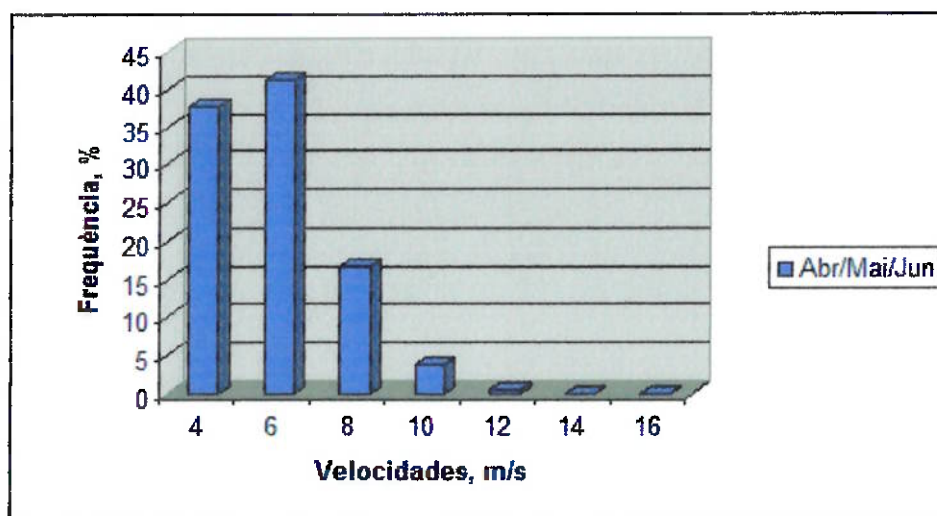


Figura 6 - Distribuição de velocidades do vento para o período de Abril a Junho.



À partir dos dados apresentados, verifica-se que uma média de velocidade dos ventos durante o ano pode ser estimada em 4,4 m/s. Esta é aproximadamente a necessário para o projeto.

4. Energia Solar

4.1. O recurso solar

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, tanto como fonte de calor como fonte de luz, é sem sombra de dúvidas uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio. E quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol.

É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a conseqüente geração de eletricidade (hidroeletricidade). A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento da radiação solar.

As principais formas de utilização da energia solar são apresentadas a seguir.

4.2. Energia solar fototérmica

Nesse caso, estamos interessados na quantidade de energia que um determinado corpo é capaz de absorver, sob a forma de calor, a partir da radiação solar incidente no mesmo. A utilização dessa forma de energia implica saber captá-la e armazená-la. Os equipamentos mais difundidos com o objetivo específico de utilizar a energia solar fototérmica são conhecidos como *coletores solares*.

Os coletores solares são aquecedores de fluidos (líquidos ou gasosos) e são classificados em *coletores concentradores* e *coletores planos* em função da existência ou não de dispositivos de concentração da radiação solar. O fluido aquecido é mantido em reservatórios termicamente isolados até o seu uso final (água aquecida para banho, ar quente para secagem de grãos, gases para acionamento de turbinas, etc.).

Os coletores solares planos são largamente utilizados para aquecimento de água em projetos residenciais, hospitais ou hotéis, devido ao conforto proporcionado e à redução do consumo de energia elétrica.

4.3. Energia solar fotovoltaica

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão.

Inicialmente o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca, por empresas do setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a “corrida espacial”. A célula solar era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo e peso) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço. Outro uso espacial que impulsionou o desenvolvimento das células solares foi a necessidade de energia para satélites.

A crise energética de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres. Porém, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia, seria necessário, naquele momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células solares em relação às células usadas em explorações espaciais. Modificou-se também o perfil das empresas envolvidas no setor. Nos Estados Unidos, as empresas de petróleo resolveram diversificar seus investimentos, englobando a produção de energia a partir da radiação solar.

Em 1993 a produção de células fotovoltaicas atingiu a marca de 60 MWp, sendo o Silício quase absoluto no “ranking” dos materiais utilizados. O Silício, segundo elemento mais abundante no globo terrestre, tem sido explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo. No entanto, a busca de materiais alternativos é intensa e concentra-se na área de filmes finos, onde o silício amorfo se enquadra. Células de filmes finos, além

de utilizarem menor quantidade de material do que as que apresentam estruturas cristalinas, requerem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação. Ou seja, possuem uma maior eficiência energética.

4.4.1. Radiação solar

O Sol fornece, por ano, $1,5 \times 10^{16}$ kWh de energia para a atmosfera terrestre. Trata-se de um valor considerável, representando 10000 vezes o consumo mundial de energia no período. Além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação fornecida pelo Sol é uma fonte inesgotável de energia, propiciando enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outras formas de energia (térmica, elétrica, etc...).

Uma das possíveis maneiras de se converter a energia descrita é através do efeito fotovoltaico que ocorre em sistemas denominados *células fotovoltaicas*. Estas células são elementos optoeletrônicos, os quais fazem a conversão direta de radiação solar em eletricidade. São basicamente constituídas de materiais semicondutores, dentre os quais o silício é o material mais utilizado.

4.4.2. Radiação solar: captação e conversão

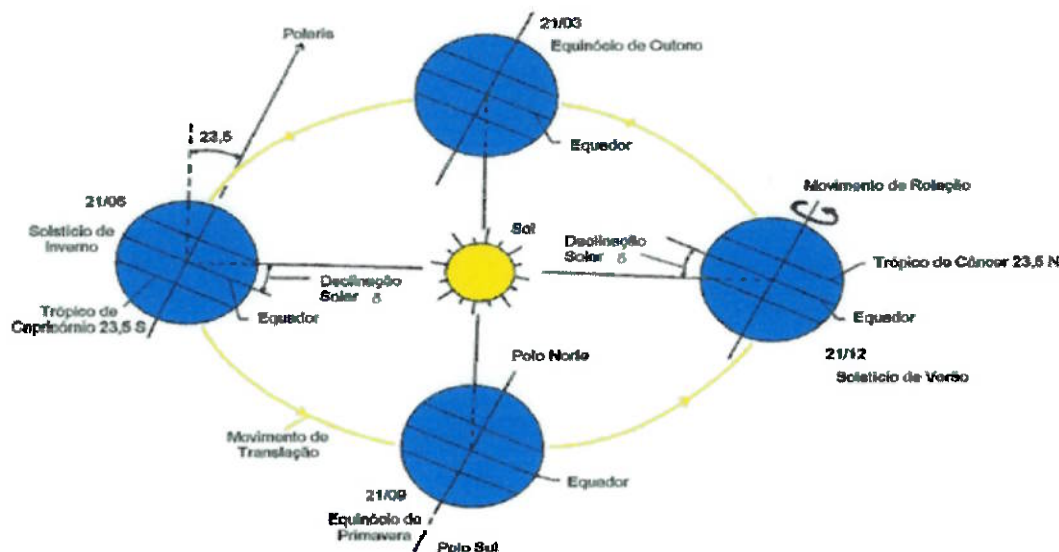
O planeta Terra, em seu movimento anual em torno do Sol, descreve uma trajetória elíptica em um plano inclinado de aproximadamente $23,5^\circ$ com relação ao Equador. Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte (em uma mesma hora), no decorrer dos dias. Isso dá origem às estações do ano, dificultando assim os cálculos da posição do Sol para uma determinada data, como é apresentado na figura.

A posição do Sol, ao meio dia solar, em relação ao plano do Equador (Norte positivo) é chamada de Declinação Solar (δ). Este ângulo, mostrado na figura 2.1.1, varia, de acordo com o dia do ano, dentro dos seguintes limites:

$$-23,45^{\circ} \leq \delta \leq 23,45^{\circ}$$

A soma da declinação com a latitude local determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade do planeta.

Figura 7 - Órbita da Terra, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,5°



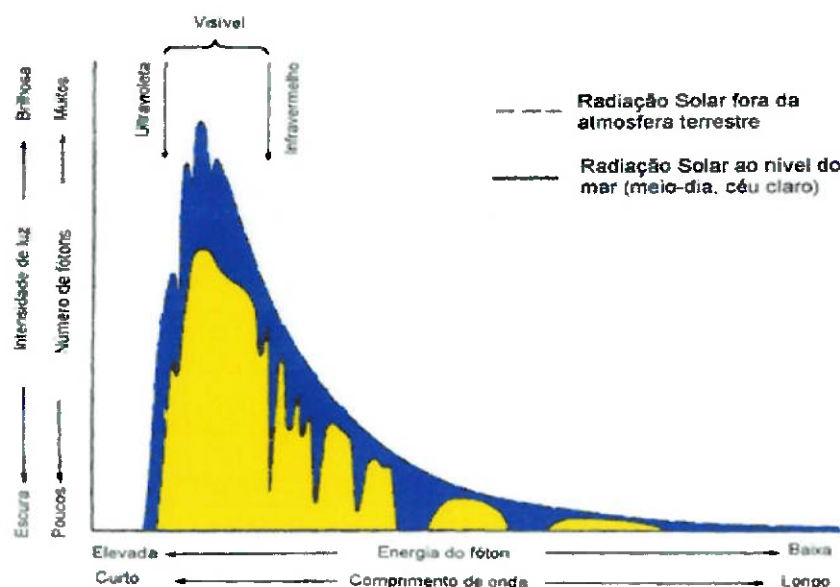
A radiação solar que atinge a atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar, uma camada de aproximadamente 300 km de espessura e temperatura superficial de cerca de 5800 K. Porém, esta radiação não se apresenta de forma regular, já que existe influência das camadas externas do Sol (cromosfera e coroa), com setores de diferentes temperaturas e erupções cromosféricas.

No entanto, define-se um valor médio para o nível de radiação solar incidente normalmente sobre uma superfície situada no topo da atmosfera. Dados recentes da WMO (World Meteorological Organization) indicam um valor médio de 1367 W/m^2 para a radiação extraterrestre. Fórmulas matemáticas permitem o cálculo, a partir da "Constante Solar", da radiação extraterrestre ao longo do ano, fazendo a correção pela órbita elíptica.

A radiação solar é radiação eletromagnética que se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s, podendo-se observar aspectos ondulatórios e corpusculares. Em termos de comprimentos de onda, a radiação solar ocupa a faixa espectral de 0,1mm a 5mm, tendo

uma máxima densidade espectral em 0,5mm, que é a luz verde. É através da teoria ondulatória, que são definidas para os diversos meios materiais, as propriedades na faixa solar de absorção e de reflexão.

Figura 8 - Distribuição espectral da radiação solar



4.4.3. Radiação ao nível do solo

De toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre. Isso se deve à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Esta fração que atinge o solo é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa.

Notadamente, se a superfície receptora estiver inclinada com relação à horizontal, haverá um terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.). O coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de “albedo”.

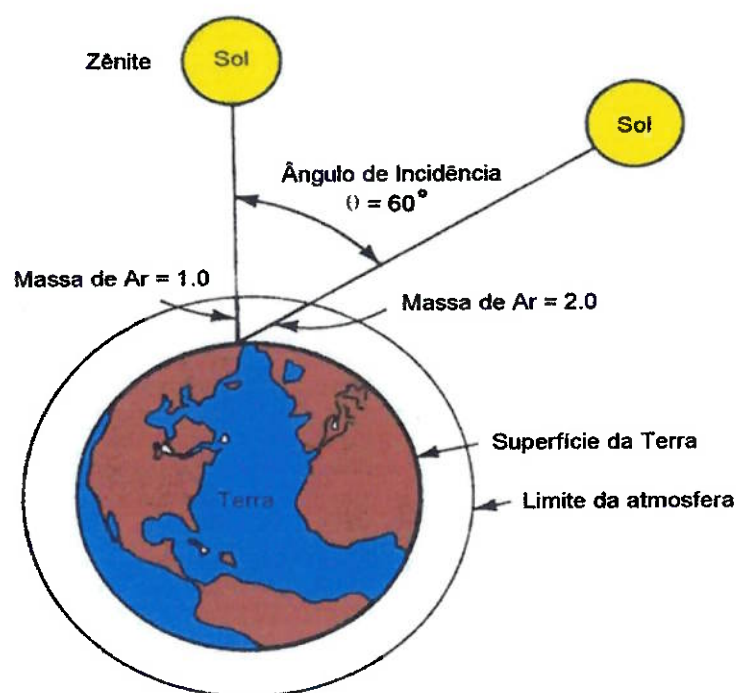
Antes de atingir o solo, as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de

absorção e espalhamento. Estas modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica, também identificada por um coeficiente denominado "Massa de Ar" (AM), e, portanto, do ângulo Zenital do Sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas.

Devido à alternância de dias e noites, das estações do ano e períodos de passagem de nuvem e chuvosos, o recurso energético solar apresenta grande variabilidade, induzindo, conforme o caso, à seleção de um sistema apropriado de estocagem para a energia resultante do processo de conversão.

Observa-se que somente a componente direta da radiação solar pode ser submetida a um processo de concentração dos raios através de espelhos parabólicos, lentes, etc. Consegue-se através da concentração, uma redução substancial da superfície absorvedora solar e um aumento considerável de sua temperatura.

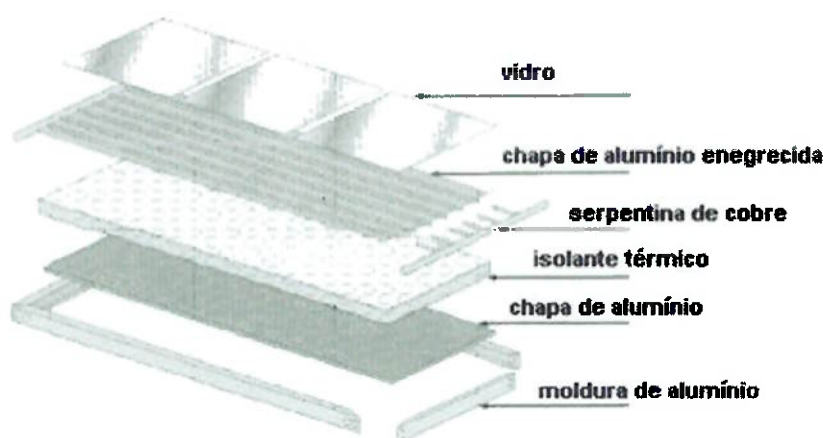
Figura 9 – Trajetória dos raios de sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM)



4.5.1. Efeito térmico: componentes

O princípio de funcionamento do aquecimento solar de água é bastante simples, baseado na transmissão de calor através dos materiais que compõem o sistema. É composto por dois itens básicos: o reservatório térmico (*boiler*) e o coletor solar (placas).

Figura 10 - Esquema de construção de um coletor solar



Como indica a figura 1, ele é composto pelos seguintes materiais:

- **Vidro:** impede que entrem no coletor, água de chuva, materiais sólidos, poeira etc. Tem como finalidade principal provocar o efeito estufa. Ou seja, a luz do sol, incidindo diretamente no vidro, faz com que parte dela penetre no interior do coletor, refletindo outra parcela de luz. Na reflexão, a luz é composta basicamente de raios infravermelhos que não conseguem ultrapassar a camada de vidro, provocando assim um aquecimento interno que ajudará no aquecimento da água que está circulando na tubulação de cobre.
- **Tubo de cobre:** serve para conduzir a água que captará o calor do sol. O cobre, sendo um ótimo condutor de calor, absorverá todo esse calor do coletor e o transmitirá para a água que está circulando.

- **Chapa de alumínio enegrecida:** tem por finalidade auxiliar no aquecimento do coletor. Pela sua cor negra, absorve melhor o calor da luz solar, transmitindo-o para os tubos de cobre e conseqüentemente para a água.
- **Poliuretano expandido ou lã de vidro:** é um material que isola termicamente o coletor, impedindo que o calor captado pela luz solar escape para o ambiente.

4.5.2. Aquecimento da água

O *boiler* serve para armazenar água quente para consumo. É fabricado de alumínio por fora e seu interior é de cobre ou aço inox. Internamente, a água quente se mistura com a fria ficando sempre na parte superior. O boiler possui resistência elétrica que aquece a água em dias em que não há luz solar suficiente. Comandada por um termostato, ela liga e desliga de acordo com a temperatura da água. Aqui também há poliuretano expandido, revestindo toda a parede interna do *boiler*. Em dias com grande luminosidade, a água quente pode ficar armazenada por várias horas sem precisar acionar a resistência elétrica. Existem *boilers* de alta pressão e de baixa pressão. Os de baixa pressão trabalham com até 5mca e os de alta pressão com até 20 mca. Os *boilers* podem ser de nível (colocado no mesmo nível da caixa fria) ou de desnível (abaixo da caixa fria). A escolha vai depender da altura da cumeeira da residência.

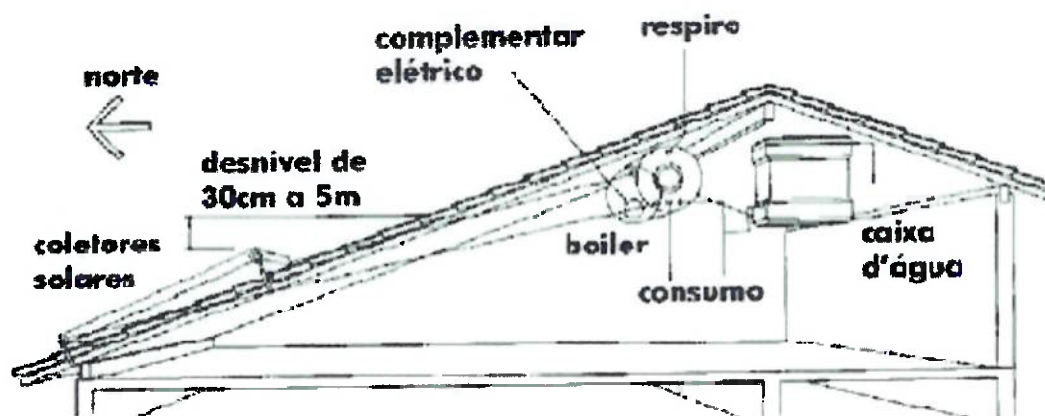
4.5.3. Circulação da água

A água sai da caixa d'água fria e vai para o *boiler*, seguindo depois para as placas que estão no telhado da casa. A água é aquecida ao passar pelas placas. Água quente retorna para o *boiler*, ficando armazenada até o seu consumo. Esta pode circular pelos coletores através de duas maneiras: natural (termosifão) ou forçada.

- **Termosifão:** a circulação ocorre devido à diferença de densidade entre a água fria e a quente. A água fria, sendo mais pesada, acaba empurrando a água quente que é

mais leve, realizando a circulação. Sua vantagem é de não precisar de energia elétrica para a movimentação da água, dispensando qualquer tipo de manutenção. Para haver esse tipo de circulação, é necessário que as placas estejam no mínimo 30 cm mais baixas que a base do *boiler*, como indica a figura 4. A distância máxima entre o boiler e as placas tem que ser de 5m, caso contrário a circulação por termosifão pode não ocorrer.

Figura 11 - Instalação através do Sistema de Termosifão



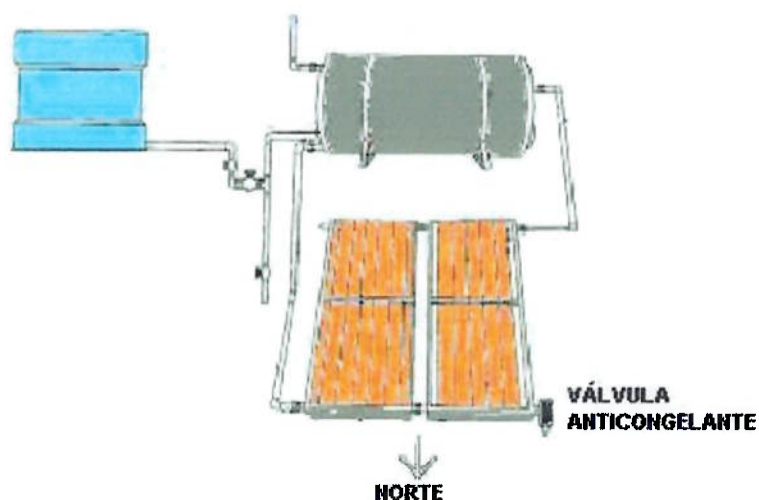
- **Forçada:** nesse caso a circulação da água não ocorre sozinha e sim por auxílio de uma microbomba instalada no circuito. As desvantagens nesse tipo de instalação são a dependência da eletricidade (110 ou 220 v) e a possibilidade de ocorrerem problemas na microbomba. O *boiler* sempre ficará abaixo dos coletores neste caso.

4.5.4. Disposição do boiler

Existem duas maneiras de se posicionar o *boiler* de acordo com a caixa d'água. São elas:

- **De desnível:** nesse modo o *boiler* se encontra abaixo da caixa d'água, situação que acontece quando temos espaço de folga entre a laje e a cumeeira.
- **De nível:** nessa situação o *boiler* se encontra no mesmo nível que a caixa d'água, caso em que o espaço entre a laje e a cumeeira é muito pequeno (figura 6).

Figura 12 - Instalação de um *Boiler* de Nível



4.5.5. Escolha do posicionamento da instalação

Para que os coletores tenham um ótimo aproveitamento da luz solar, é recomendado o seu posicionamento ao norte geográfico. Para a sua localização correta é necessária a utilização de uma bússola. O norte geográfico está situado sempre à direita do norte magnético e varia de acordo com o local. Para a cidade de São Paulo, o norte geográfico está a 18° à direita do norte magnético. Em geral, ele se encontra aproximadamente a 20° para o Brasil. Esta regra também é válida para o posicionamento dos painéis fotovoltaicos.

4.5.6. Inclinação dos coletores

A inclinação dos coletores requer muito cuidado na hora de serem instalados. Para sabermos a inclinação ideal, utilizaremos a seguinte regra: *Latitude do local + 10°*.

Tabela 3 - Latitudes de algumas Cidades Brasileiras e a Inclinação dos Coletores

Cidade	Latitude (grau)	Inclinação (grau)
São Paulo	24	34
Porto Alegre	30	40
Curitiba	25	35
Florianópolis	28	38
Rio de Janeiro	23	33
Campo Grande	20	30
Belo Horizonte	20	30
Salvador	13	23
Fortaleza*	4	14
Brasília	16	16
Manaus*	2	12
Cuiabá	16	26
Natal*	6	16
Recife*	8	18

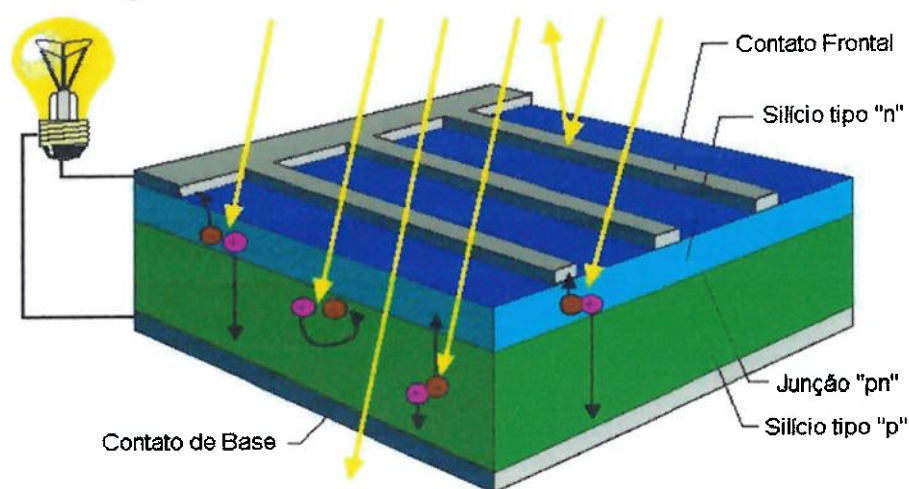
*Quando a inclinação for menor que 20° é recomendada a instalação de um suporte, pois a inclinação mínima é de 20° para garantir o fluxo adequado de água.

4.6.1. Efeito fotovoltaico: introdução

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores. Estes se caracterizam pela presença de bandas de energia. Na banda de valência é permitida a presença de elétrons, enquanto que a banda de condução permanece totalmente “vazia”.

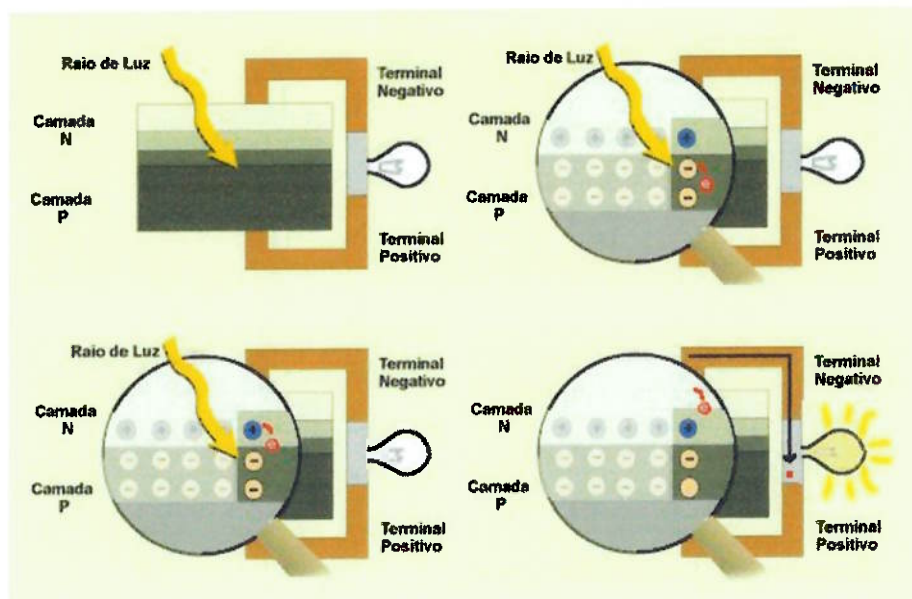
O semiconductor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e 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*.

Figura 13 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica



Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá a falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada *buraco* ou *lacuna*. Dessa forma, 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*.

Figura 14 – Efeito fotovoltaico na junção *pn*



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, causando uma redução de elétrons do lado n e tornando-o 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 que o *gap*, 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 a base do funcionamento das células fotovoltaicas.

4.6.2. Componentes do sistema fotovoltaico

Os sistemas fotovoltaicos autônomos são compostos basicamente pelos seguintes equipamentos:

- *painel fotovoltaico* – formado por um ou mais módulos fotovoltaicos, que funcionam como um gerador de energia elétrica;
- *banco de baterias* - formado por uma ou mais baterias, normalmente baterias Chumbo-ácido 12V seladas. Este funciona como elemento armazenador de energia elétrica para uso durante a noite e em períodos de nebulosidade, quando não há disponibilidade de radiação solar;
- *controlador de carga* – dispositivo eletrônico que tem como finalidade proteger as baterias contra sobrecarga ou descarga excessiva;
- *inversor* – dispositivo eletrônico que transforma a energia elétrica de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), de modo a permitir a utilização de equipamentos elétricos convencionais; Existem sistemas pequenos, no entanto, que não empregam inversor e utilizam cargas (luminárias, TV, etc.) alimentadas diretamente por corrente contínua (CC).

4.6.3. Tipos de Célula

- SILÍCIO MONOCRISTALINO

A célula de silício monocristalino é historicamente a mais usada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade. A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza de 98 a 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e de custo. Para funcionar como célula fotovoltaica este silício necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior, devendo chegar à faixa de 99,9999% de pureza.

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 às 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, extrai-se do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro é obtido e cortado em fatias finas de aproximadamente 300 μ m.

Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, deve-se introduzir impurezas do tipo N, de forma a se 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°C 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 à 18% em células feitas em laboratórios.

- SILÍCIO POLICRISTALINO

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

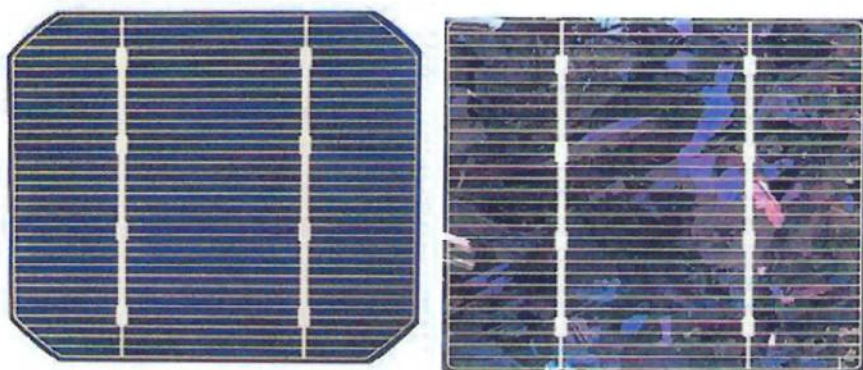
anos o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais.

- SILÍCIO AMORFO

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 por 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; 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 citadas. São elas:

- processo de fabricação relativamente simples e barato;
- possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;
- baixo consumo de energia na produção.

Figura 15 – Célula de silício monocristalino e policristalino, respectivamente

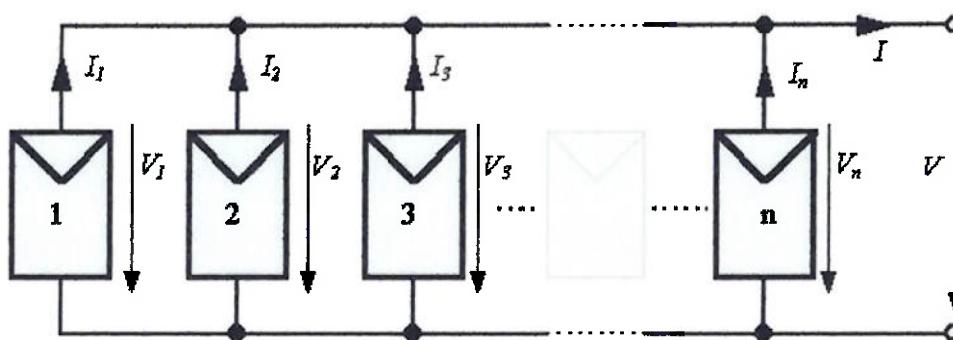


4.6.4. Módulos Fotovoltaicos

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

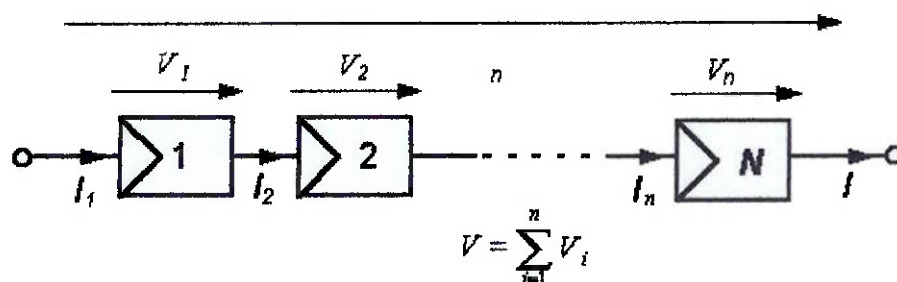
Ao conectar as células em paralelo, soma-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7V) este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

Figura 16 – Conexão de células em paralelo



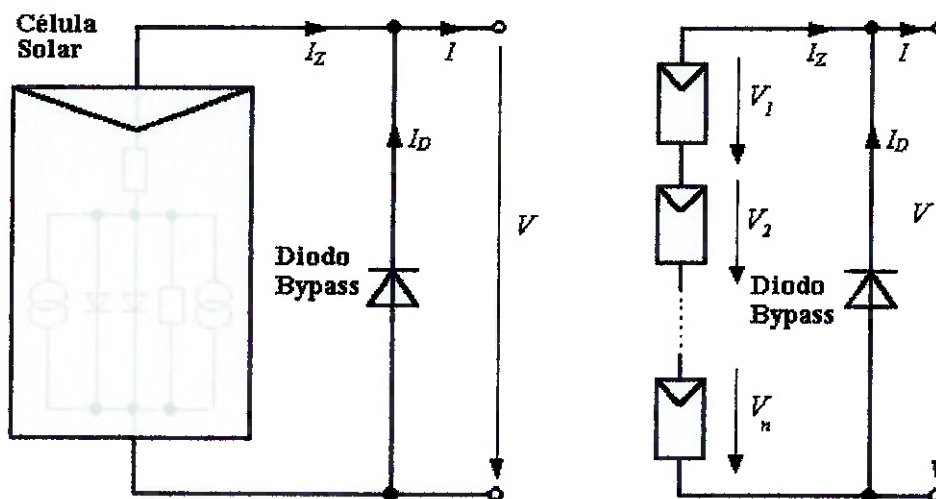
A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arrajo em série. Este consiste em agrupar o maior número de células em série onde soma-se a tensão de cada célula chegando a um valor final de 12V o que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que também funcionam na faixa dos 12V.

Figura 17 – Arranjo das células em série



Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta, a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por consequência comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo ou de “bypass”. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo bypass é feito em grupamentos de células, o que torna esta alternativa muito mais barata se comparada ao custo de conectar um diodo em cada célula.

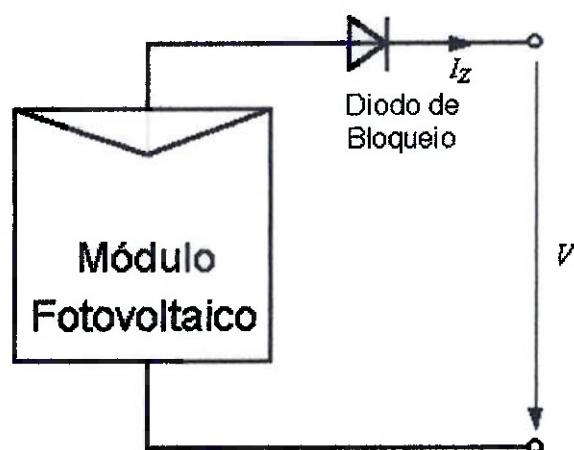
Figura 18 – Possível ligação para um diodo bypass entre células



Um outro problema que pode acontecer é quando surge um corrente negativa fluindo pelas células, ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso

mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo, causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, usa-se um diodo de bloqueio impedindo assim correntes reversas, que podem ocorrer caso o módulo seja ligado diretamente em um acumulador ou bateria.

Figura 19 – Diodo de bloqueio



4.6.5. Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico. Tão necessário quanto este parâmetro são as características elétricas que caracterizam a funcionabilidade do módulo. 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 1000W/m^2 (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de 25°C na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura).

Figura 20 – Curvas característica IxV e curva da potência pela tensão, respectivamente

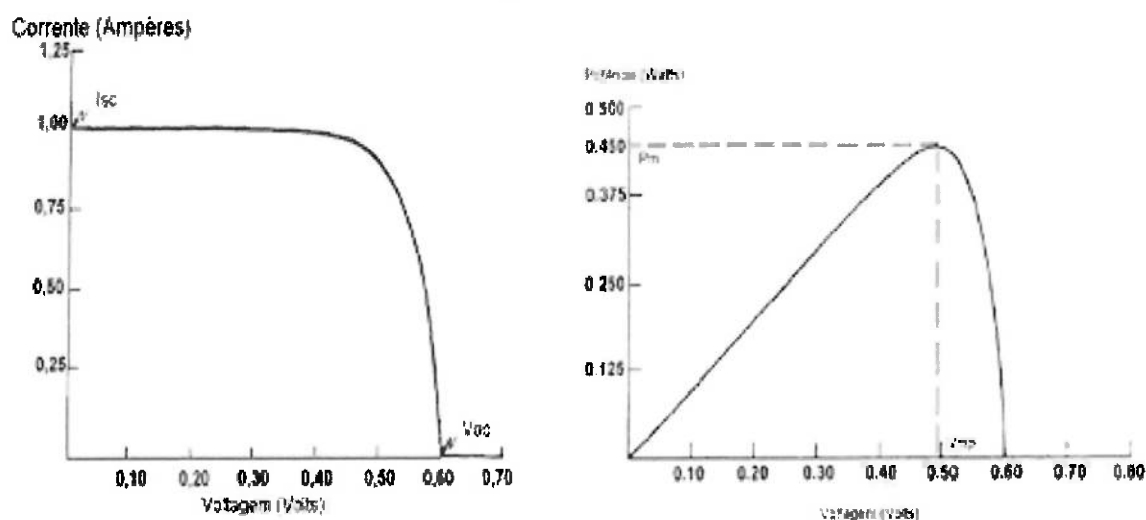
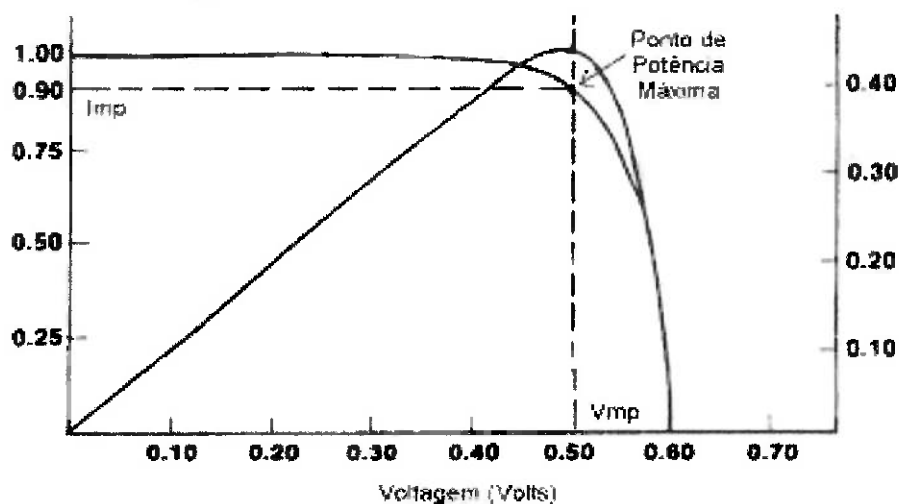


Figura 21 – Parâmetros de potência máxima

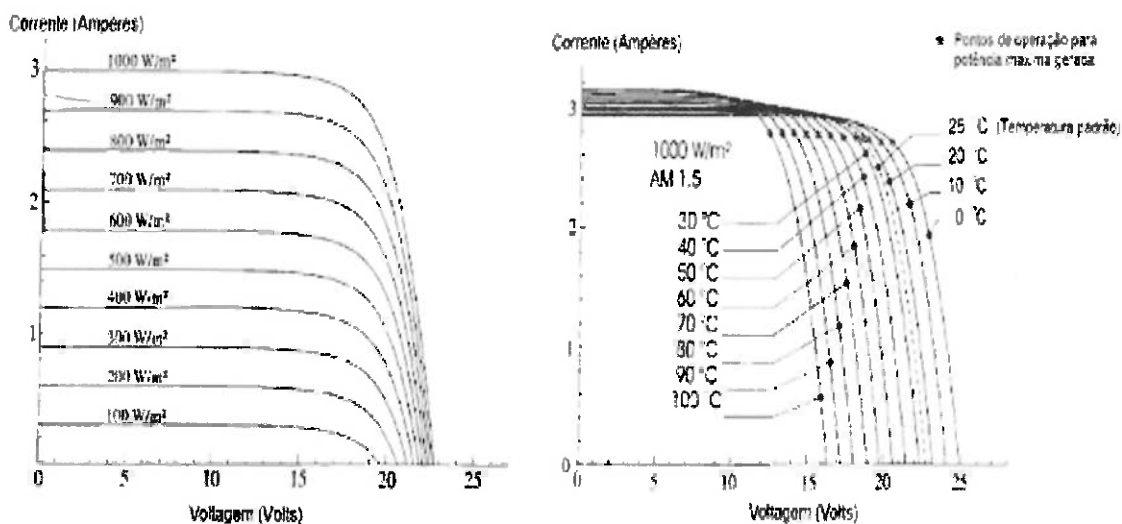


Parâmetros de potência máxima

4.6.6. Fatores que afetam as características elétricas dos módulos

Os principais fatores que influenciam as 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.

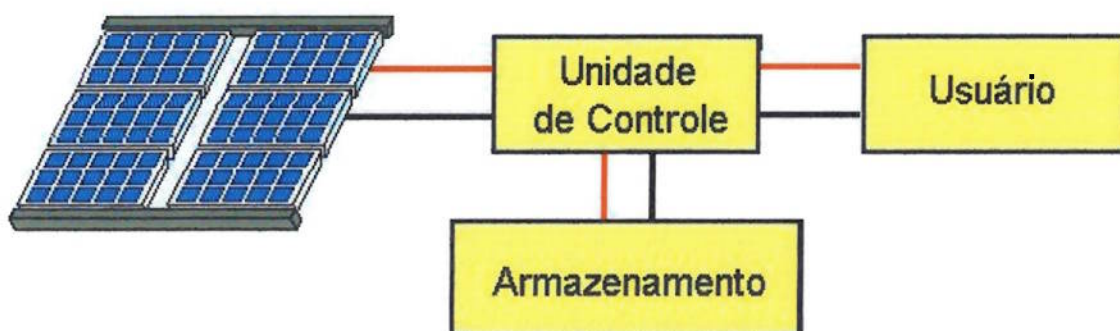
Figura 22 – Efeito causado pela variação da intensidade luminosa e pela temperatura na célula, respectivamente



4.6.7. O sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados a rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica onde o sistema deverá ter uma unidade de controle de potência e também uma unidade de armazenamento.

Figura 23 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico



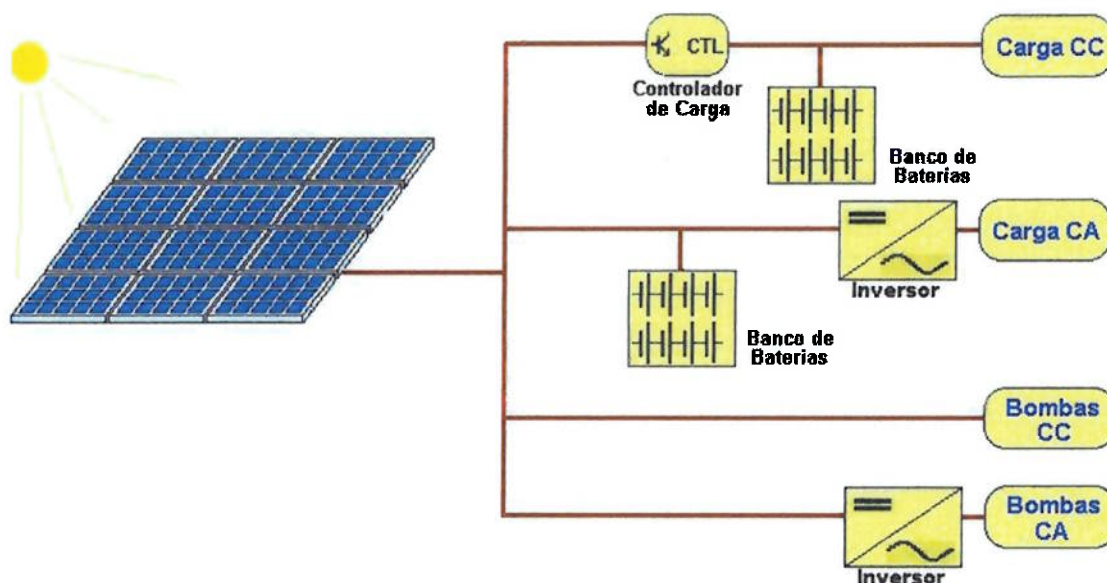
4.6.8. Sistemas isolados

Sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos ou armazena-se na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, o que é o caso da irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida ou estocada em reservatórios.

Em sistemas onde é necessário o armazenamento de energia em baterias, utiliza-se um dispositivo para controlar a carga e a descarga na bateria. O “controlador de carga” tem como principal função não deixar que ocorram danos na bateria por sobrecarga ou descarga profunda. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC).

Para alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA) é necessário um inversor. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para otimização da potência final produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto na utilização de eletrodomésticos convencionais.

Figura 24 – Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada



4.6.9. Sistemas híbridos

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. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica torna-se um empecilho quando se quer otimizar o seu uso. É necessário um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário.

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, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular para cada caso.

Figura 25 – Exemplo de sistema híbrido



4.7. Projeto e dimensionamento do sistema de geração solar

Com a quantidade de energia gerada pelo aerogerador em mãos, sabe-se que 454,7 kWh/mês devem ser fornecidos pelo sistema solar. Para se definir quais os elementos a serem utilizados no projeto, serão realizados cálculos para se verificar se os itens atendem a necessidade de projeto e, dentro deste contexto, identificar um conjunto mais barato. Outros fatores poderiam ser considerados na análise (como peso e área da placas, eficiência, facilidade de encontrar os produtos da marca e qualidade dos painéis, entre outros), mas como será apresentado a seguir, estes variam pouco entre as diversas opções consideradas. Desta forma, os critérios de escolha do sistema são basicamente atendimento à necessidade de fornecimento de energia e o custo do sistema.

A seguir apresentam-se alguns tipos de painéis fotovoltaicos disponíveis atualmente e seus custos.

Tabela 4 – Preços de painéis fotovoltaicos

Potência de Pico	Modelos	Fabricante	Preço (R\$)
Classe 5 W	KS-5A	Kyocera	325, ⁰⁰
	ST 5	Shell Solar	320, ⁰⁰
	I-05	Isofoton	312, ⁰⁰
Classe 10 W	KS-10A	Kyocera	430, ⁰⁰
	ST10	Shell Solar	458, ⁰⁰
	S10	Shell Solar	443, ⁰⁰
	SX 10U	BP Solar	476, ⁰⁰
	I-10	Isofoton	480, ⁰⁰
Classe 20 W	S25 Novo	Shell Solar	625, ⁰⁰
	ST20	Shell Solar	895, ⁰⁰
	KS-20A	Kyocera	725, ⁰⁰
	SX 20M	BP Solar	700, ⁰⁰
	I-22	Isofoton	754, ⁰⁰
Classe 30 W	SX 30U	BP Solar	698, ⁰⁰
	KC35	Kyocera	780, ⁰⁰
	S36 Novo	Shell Solar	850, ⁰⁰
Classe 40 W	SM 46	Shell Solar	979, ⁰⁰
	SX 40 U	BP Solar	930, ⁰⁰
	KC 45	Kyocera	1.060, ⁰⁰
	I-47	Isofoton	1.073, ⁰⁰
Classe	KC 50	Kyocera	1.110, ⁰⁰

50 W	SM50H	Shell Solar	1.011, ⁰⁰
	SX 50U	BP Solar	1.160, ⁰⁰
	SX 55U	BP Solar	1.278, ⁰⁰
	I-50	Isofoton	1.050, ⁰⁰
	I-55	Isofoton	1.359, ⁰⁰
Classe 60 W			
	SX 60U	BP Solar	1.290, ⁰⁰
	SP 65	Shell Solar	1.349, ⁰⁰
Classe 70 W	SQ 70 Novo	Shell Solar	1.416, ⁰⁰
	BP 275	BP Solar	1.495, ⁰⁰
	SQ 75 Novo	Shell Solar	1.484, ⁰⁰
Classe 80 W	SQ 80 Novo	Shell Solar	1.551, ⁰⁰
	KC 80	Kyocera	1.580, ⁰⁰
	SX 80U	BP Solar	1.680, ⁰⁰
Classe 90 W			
	I-94	Isofoton	1.963, ⁰⁰
Classe 100 W	SM 100 Novo	Shell Solar	2.293, ⁰⁰
Classe 110 W	SM 110 Novo	Shell Solar	2.293, ⁰⁰
Classe 120 W	SX 120U	BP Solar	2.330, ⁰⁰
Classe 160 W	SQ 160 (24V) Novo	Shell Solar	2.920, ⁰⁰

Fonte: <http://www.energia-alternativa.com.br/painel.htm>

Como forma de reduzir o custo total do sistema solar verificou-se ainda a viabilidade ou não de se complementar o sistema com um sistema de aquecimento de água térmico. A seguir são apresentados os custos de sistemas deste tipo, de diferentes fabricantes (número de placas foi indicado pelo fabricante de acordo com as informações de número de pessoas e tempo de banhos diários), que atendem as necessidades do projeto.

Tabela 5 – Custos de sistemas de aquecimento de água térmico

Empresa	Equipamento	Preço	Instalação	Material hidráulico
Enalter	400 litros 2 placas 2m2	R\$ 1772,00	R\$ 900,00	
Soletrol	400 litros 4 placas 1,03 m2	R\$ 2214,40	R\$ 320,00	R\$ 522,00
Tuma Industrial/ Velco	400 litros 6 placas 1 m2	R\$ 2578,00	R\$ 300,00	R\$ 300,00
Transen	400 litros 4 placas 1 m2	R\$ 1757,00	R\$ 320,00	R\$ 450,00

Já que o custo e fornecimento de energia de cada um destes sistemas são muito parecidos, optou-se pelo sistema da Soletrol devido a maior facilidade de obtenção de dados dos produtos. Segundo o fabricante, cada placa é capaz de fornecer 70 kWh/mês. O conjunto é então capaz de fornecer 280 kWh/mês.

Para se definir a quantidade de painéis solares, consultou-se o sistema Webbee da USP. Dele é possível extrair dados sobre o fornecimento de energia solar na região escolhida. Abaixo é apresentado a média dos valores obtidos para a radiação solar no último ano entre julho de 2003 e julho de 2004.

SISTEMA WEBBEE

Instrumento : 8

Período : De 2003-07-01 00:00:00

Ate 2004-07-01 00:00:00

	MÉDIA	MÁX	MIN
Radiação Solar (W/ m ²)	121.29	949	0

quantidade de registros : 35599

SQ 160

Primeiramente optou-se por 27 painéis 160W SQ 160 (24V), gerando um custo de aproximadamente R\$ 78.840,00. Com uma área de $1,622 \times 0,814 = 1,32\text{m}^2$ e eficiência de 15%, os 27 módulos seriam capazes de gerar em torno de $27 \times 121,29 \times 1,32 \times 0,15 = 648,4 \text{ W}$, ocupando uma área de $35,64 \text{ m}^2$. Por mês, esta média se traduz em $648,4 \times 24 \times 30 = 466,8 \text{ kWh/mês}$. Caso fossem utilizados 26 painéis, a geração de energia seria de $449,6 \text{ kWh/mês}$ (R\$ 75.920,00). A área ocupada pelo sistema seria de $34,32 \text{ m}^2$.

A seguir são feitos os mesmos cálculos para outros modelos de painéis, a fim de se verificar qual deles é o mais barato.

SX 120U

Supondo a utilização de painéis modelo SX 120U, para se gerar a mesma quantidade de energia, seriam necessários 33 painéis (área de $1,06\text{m}^2$), pois: $33 \times 121,29 \times 1,06 \times 0,15 = 636,4 \text{ W}$. O equivalente a $458,2 \text{ kWh/mês}$ (R\$ 76.890,00) e área de ocupação de $34,98 \text{ m}^2$. Com 32 painéis: $617,1 \text{ W}$, $444,3 \text{ kWh/mês}$, custo de R\$ 74.560,00 e área de $33,92 \text{ m}^2$.

SX 80U

Supondo agora o modelo SX 80U, seriam necessários 48 painéis (área de $0,73 \text{ m}^2$): $48 \times 121,29 \times 0,73 \times 0,15 = 637,5 \text{ W}$, 459 kWh/mês , custo de R\$ 80.640,00 e área de $35,04\text{m}^2$. Com 47 painéis: $624,2 \text{ W}$, 449 kWh/mês , custo de R\$ 78.960,00 e área de $34,31\text{m}^2$.

SX 60U

Se forem utilizados painéis de baixa potência, como o modelo SX 60U, chega-se a estes valores: 63 painéis (área de $0,555 \text{ m}^2$), $63 \times 121,29 \times 0,555 \times 0,15 = 636,1 \text{ W}$, e custo de R\$ 81.270,00 e área de $34,96 \text{ m}^2$. Com 62 painéis: 626 W , $450,7 \text{ kWh/mês}$, custo de R\$ 79.980,00 e área de $34,41 \text{ m}^2$.

Agora será feita uma análise do conjunto caso seja utilizado o sistema de aquecimento de água térmico anteriormente apresentado. Isto causaria uma redução de 270 kWh/mês no fornecimento de energia exigido do sistema solar (apesar da energia térmica gerada ser de 280 kWh/mês , apenas 270 kWh/mês são utilizados para aquecimento da água – chuveiro elétrico). A nova quantidade de energia que deve ser fornecida pelos painéis fotovoltaicos é de: $454,7 \text{ kWh} - 270 \text{ kWh} = 184,7 \text{ kWh/mês}$. A potência é então: $184,7/720 = 256,5 \text{ W}$. Para os mesmos modelos de painéis, têm-se as características:

SQ 160 – 11 painéis: $264,2 \text{ W}$, área de $14,52 \text{ m}^2$, peso de $189,2 \text{ kg}$ e custo de R\$ 32.120,00.

- 10 painéis: $240,2 \text{ W}$, área de $13,20 \text{ m}^2$, peso de $172,0 \text{ kg}$ e custo de R\$ 29.200,00.

SX 120U – 14 painéis: $270,0 \text{ W}$, área de $14,84 \text{ m}^2$, peso de $179,2 \text{ kg}$ e custo de R\$ 32.620,00.

- 13 painéis: $250,7 \text{ W}$, área de $13,78 \text{ m}^2$, peso de $166,4 \text{ kg}$ e custo de R\$ 30.290,00.

SX 80U – 20 painéis: $265,6 \text{ W}$, área de $14,60 \text{ m}^2$, peso de $190,0 \text{ kg}$ e custo de R\$ 33.600,00.

- 19 painéis: $252,3 \text{ W}$, área de $13,84 \text{ m}^2$, peso de $180,5 \text{ kg}$ e custo de R\$ 31.920,00.

SX 60U – 26 painéis: 262,5W, área de 14,43 m² , peso de 187,2kg e custo de R\$ 33.540,00.

- 25 painéis: 252,4W, área de 13,88 m² , peso de 180,0kg e custo de R\$ 32.250,00.

Com os resultados acima, verifica-se que a escolha dos painéis torna-se mais difícil. Depois de se observar a análise acima, fica claro que um sistema que utilize aquecimento térmico de água é mais vantajoso, já que o custo do conjunto é aproximadamente a metade daquele composto apenas pelo sistema fotovoltaico. Para se decidir entre as opções apresentadas é montada uma matriz de decisão, a qual envolve as possibilidades de sistemas com aquecimento solar. Aqui, o mais importante é atender à potência exigida, sendo que uma potência que ultrapasse o necessário também não é desejado.

Tabela 6 – Matriz de decisão entre os sistemas apresentados

	Potência (5)	Preço (4)	Área (3)	Peso (2)	TOTAL
SQ160 - 11	3	2	2	1	31
-10	1	5	5	4	46
SX120U - 14	2	2	1	1	23
-13	3	4	3	5	50
SX80U - 20	3	1	1	1	24
-19	4	3	3	3	47
SX60U - 26	3	1	2	2	29
-25	4	2	3	3	43

Opta-se então pela alternativa de utilização de 13 painéis modelo SX 120U, e um sistema de aquecimento de água de 400 litros da marca Soletrol. O custo final do sistema solar é então R\$ 33.346,40.

Conclui-se o projeto do sistema solar com a definição da inclinação dos painéis. Esta se torna ideal para a captação dos raios solares quando é de 24° (para a região de São Paulo).

5. Acessórios

As baterias a serem utilizadas são: [Surrette 5000 Series 4-KS-25PS Flooded Deep Cycle Battery, 4V,1900 Ah](#)

Estas são importadas e custam em torno de US\$ 1000,00 cada*. A capacidade do banco de baterias é obtida com a fórmula:

$$\text{Cap.} = 1,66 \times \text{Dtot} \times \text{Aut.}$$

1,66: fator de correção de bateria de acumuladores que leva em conta a profundidade de descarga admitida, o envelhecimento e um fator de temperatura.

Dtot: Procura total de energia da instalação em Ah/dia. Isto se obtém dividindo os Wh/dia totais que surgem da folha de dimensionamento pela tensão do sistema.

Aut: dias de autonomia.

Desta forma, optando-se por uma autonomia de 6 dias, teríamos:

$$\text{Cap.} = 1,66 \times [(780000 \text{ Wh/mês} / 30 \text{ dias}) / 24 \text{ volts}] \times 6 \text{ dias} = 10790 \text{ Ah}$$

Ou seja, se fosse utilizada apenas uma bateria, ela deveria ser de 10790 Ah. Dentre os diversos tipos de bateria consultados, a única que apresenta vida útil de 20 anos é o modelo acima. Este foi o motivo de sua escolha, pois a troca de baterias no período representaria um custo desnecessário. Desta forma, seriam necessárias 6 baterias do tipo apresentado e associadas em série (já que os painéis e a turbina eólica geram 24V) para suprir as necessidades do projeto (já que $10790 \text{ Ah} / 1900 \text{ Ah} = 6$). O total do custo com o banco de baterias seria de US\$ 6.000,00 , ou R\$ 18.000,00.

O controlador de carga a ser utilizado, pela facilidade de obtenção, é o modelo:

C-40 Controlador de carga 40A 12/24/48V (TRACE ENGINEERING)*

O dispositivo custa em torno de R\$ 1.000,00.

* fonte: <http://store.aapspower.com/4k4v1900ah.html>

6. Viabilidade Econômica

Tanto a energia solar como a energia eólica são fontes confiáveis e tecnologicamente bastante acessíveis. Porém, aspectos técnicos e econômicos muitas vezes inviabilizam suas utilizações para geração de energia elétrica. Entretanto, a falta de informação por parte dos consumidores, a falta de uma análise quantitativa qualificada e de uma política de incentivo adequada são os maiores obstáculos para a utilização das energias alternativas. Além disso, esses fatores contribuem fortemente para intensificar a concepção generalizada de inviabilidade econômica de todos os tipos e subtipos de novas energias.

O intuito principal do trabalho é analisar e verificar as características do sistema projetado e se estas atendem de forma satisfatória às exigências, com posterior verificação de viabilidade, tanto econômica quanto técnica do mesmo. Para tanto reuniu-se os custos totais de instalação e implementação do sistema. Como mostrado anteriormente, verifica-se que os custos para cada sistema são os seguintes:

Sistema eólico:

Aerogerador com controlador de carga incluso _____	R\$ 16.100,00.
Torre de sustentação _____	R\$ 2.300,00.
Acessórios _____	R\$ 2.500,00.

Sistema solar:

Conjunto com 06 placas fotovoltaicos _____	R\$ 33.346,40.
Conjunto do sistema térmico _____	R\$ 3.056,40.
Controlador de carga das placas _____	R\$ 1.000,00.
Acessórios _____	R\$ 2.500,00.

Sistema como um todo:

Inversor de corrente _____	R\$ 4.500,00.
Banco de baterias _____	R\$ 18.000,00.

Total _____ **R\$ 83.302,80.**

Assumindo que no projeto sejam usados os dois sistemas (eólico e solar) e estimando que os equipamentos listados acima atendam a demanda de consumo de uma residência com 4 pessoas, conclui-se que o investimento para a implantação do sistema híbrido de geração de energia residencial seria da ordem de R\$ 83.302,80. Está prevista ainda a utilização de acessórios como cabos e o sistema de fixação dos painéis solares, o que acaba aumentando o custo final de R\$ 5.000,00 (sujeito à variações dependentes da residência).

Considerando a vida útil dos equipamentos (incluindo as baterias), que é de 20 anos, pode-se fazer uma comparação de custo do sistema em questão com o gasto de energia elétrica de uma residência de São Paulo com 4 pessoas e média de 780 kWh/mês. Verificou-se que a conta de energia para uma residência como esta é de aproximadamente R\$ 320,00 (pois: $780 \times 0,31151 + \text{ICMS}$). Desta forma, e desconsiderando prováveis aumentos no custo da tarifa, chega-se ao seguinte valor com despesas energéticas no período de 20 anos: R\$ 76.800,00. Este valor não pode ser comparado aquele de projeto, no entanto. Deve-se trazer este custo pago no decorrer dos 20 anos para o presente. Realizando este cálculo, para uma taxa de juros de 1% (poupança), chega-se a R\$ 29.000,00. Este representa o custo real da conta energética no período. Verifica-se portanto, que o projeto não é viável do ponto de vista econômico.

7. Sistemas com geradores

Nesta seção será feita uma comparação do sistema projetado com outro sistema, o qual tem como fonte de energia um gerador à combustão. Esta comparação se dará de duas maneiras distintas. Primeiramente será comparado o sistema híbrido projetado com um sistema composto apenas por um gerador. A potência do gerador foi estimada considerando-se que a maioria dos itens da residência estivessem ligados ao mesmo tempo, sendo um sistema sem banco de baterias (este é o modo mais comum de utilização de geradores, mas como fonte de energia de segurança, caso haja falta de energia). O segundo caso compara o sistema híbrido projetado com outro composto por painéis e placas solares, turbina(s) eólica(s) e um gerador a diesel.

O primeiro é o caso mais crítico para o gerador, exigindo maior potência do mesmo. Na situação em estudo, com a maioria dos itens sendo utilizados simultaneamente, a potência fornecida pelo gerador deve ser de aproximadamente 30kW (soma de todas as potências médias). Desta forma, o gerador a ser utilizado deve ser de no mínimo 30 kW para que o fornecimento de energia esteja garantido em qualquer situação. A seguir são mostrados dois geradores disponíveis no mercado e que atendem às exigências impostas.

GRUPO GERADOR LIFTER/MWM

Referência: PSW55KVA

Modelo: PSW55

Marca: PRAMAC / LIFTER

Potência: 50KVA / 55KVA Voltagem: 220V/380V Capacidade: 100L

Notas: Diesel , trifásico , partida elétrica , painel de controle , motor mwm d229 4 cilindros , alternador weg gta200si12 , 810kg

Preço: **R\$ 26600.00**

Fonte: <http://www.agraupe.com/produtos.php?pagina=3&produto=Grupos-geradores>

Gerador Try Ds27

Motor	Yanmar
-------	--------

Potência	25 Kva
Amperes	38 Amp.
Nível Sonoro	insonorizados
Consumo	4 l./hora
nº de cilindros	4
Rotação	1500/m.
Peso	733 Kg
Deposito Combustível	45 l.
Preço	10.380.00 € c/ Quadro manual
Preço	10.937.00 € autom.

Fonte: <http://www.euroser.pt/produtos/geradores.htm>

Pode-se observar que os custos estão em torno de R\$ 30.000,00. O consumo estimado para o gerador (supondo que este fique ligado por 6 horas por dia – quando algum item da casa necessitar de energia), tomando como base os dados apresentados, é de aproximadamente 4 litros de diesel por hora. Desta forma, em um mês serão consumidos 720 litros do combustível. Segundo pesquisa de preços*, o litro mais barato de diesel custa R\$ 1,60. Portanto, em um mês seriam gastos $720 \times 1,60 = \text{R\$ } 1.150,00$ somente com o combustível. Destas informações é possível observar que este sistema, descontando os gastos com a manutenção, apresentaria um custo de mais de R\$ 300.000,00 no período de 20 anos (vida útil das baterias e equipamentos solar e eólico). Transportando estas parcelas de R\$ 1.150,00 por mês por 20 anos para o presente, para uma taxa de juros de 1% (poupança), e ainda supondo ao menos uma troca do equipamento no período (em torno do décimo ano), este seria R\$ 113.532,17.

* fonte: <http://www.setass.ms.gov.br/Setass/Destaques/20041125Combustivel.htm>

Uma opção de redução de custos seria a escolha de um gerador menos potente, às custas da limitação de uso de determinados componentes da casa de forma simultânea. Abaixo são apresentados dois modelos mais simples de gerador.

GRUPO GERADOR AUTOMATICO

Referência: MD351G/15KVA

Modelo: MD351G

Marca: RUGGERINI

Potência: 15KVA /

Notas: Diesel , trifásico , 1800rpm , motor ruggerini , partida elétrica automática , completo

Preço: **R\$ 16150.00**

Fonte: <http://www.agraupe.com/produtos.php?pagina=4&produto=Grupos-geradores>

GRUPO GERADOR YANMAR

Referência: YG125TRE.A0010

Modelo: YG12,5TRE

Marca: YANMAR

Potência: 11KVA / 12,5KVA

Notas: Diesel , trifásico , partida elétrica , radiador , 265kg

Preço: **R\$ 11761.00**

Fonte: <http://www.agraupe.com/produtos.php?pagina=5&produto=Grupos-geradores>

Verificou-se que o consumo de um gerador de 6,5kW é de 3,26 litros de diesel por hora*. Portanto, sendo o consumo do gerador de 25kW de 4 l/h, e o do outro de 6,5kW de 3,26 l/h, embora estes sejam de fabricantes diferentes, pode-se certamente dizer que o consumo de um equipamento de aproximadamente 15kW estará entre 3,26 l/h e 4l/h. Estimando o consumo em 3,5l/h, o número de litros consumidos mensalmente estaria em torno de 630 (para 6 horas de utilização diária).

* fonte: <http://www.energia-alternativa.com.br/geraporta.htm> - gerador EP 6500S

O custo total do equipamento (em 20 anos, descontando a manutenção) seria de aproximadamente $2 \times 12.000 + 630 \times 1,60 \times 240 = \text{R\$ } 266.000$. Da mesma forma, o valor presente do sistema é $\text{R\$ } 107.181,91$.

Verifica-se que o gasto com o sistema está basicamente no combustível utilizado, sendo apenas uma pequena fração deste direcionado ao equipamento em si. Esta não é,

portanto, uma alternativa viável para o projeto em questão. Isto se deve principalmente ao fato do equipamento precisar estar ligado sempre que algum item da residência estiver funcionando (já que não há banco de baterias). Desta forma, como dificilmente vários itens estarão funcionando simultaneamente, grande parte de energia sendo gerada será desperdiçada.

O segundo caso será analisado agora. Como apresentado anteriormente, será estudado um sistema que utiliza as formas de energia até aqui estudadas. Logicamente, como neste caso o banco de baterias está presente, não há a necessidade de um gerador tão potente.

Seguindo a mesma idéia utilizada no início do projeto, cada componente do sistema será responsável por partes aproximadamente iguais de geração de energia, de forma a não sobrecarregar os outros equipamentos. Dos 780 kWh/mês necessários, descontados 270 kWh/mês do sistema térmico (que permanece o mesmo, já que o aquecimento da água não sofre a influência do restante do conjunto), 510 kWh/mês devem ser gerados pelas células fotovoltaicas, turbina eólica e gerador a diesel. Assim, cada equipamento será dimensionado para gerar em torno de 170 kWh/mês.

Escolha da turbina: A partir dos quesitos julgados importantes anteriormente, tem-se:

Tabela 7 – Matriz de decisão do sistema eólico a ser utilizado

	Potência (5)	Espaço (4)	Preço (3)	Velocidade de partida (2)	TOTAL
1 X Bergey BWC XL.1	5	4	4	5	63
2 X Whisper H40	4	1	3	3	36
1 X Whisper H80	3	5	5	4	58
1 X Whisper 175	3	2	1	3	32

O objetivo do sistema é atender a necessidade de potência desejada. Desta forma, a turbina Whisper H80 por exemplo, apesar de atender a esta necessidade para uma velocidade do vento de 5,4 m/s, que não é a condição de projeto, à 4,4 m/s, esta certamente não atenderá às exigências (pois como a potência gerada não é proporcional à velocidade do vento, reduzindo esta de 20%, a potência cairá mais do que este valor e ficará abaixo do esperado). Portanto optou-se pela utilização de uma turbina modelo Bergey BWC XL.1

(R\$ 5912,00). Como esta gera 250 kWh/mês, estima-se que atenderá às exigências (a potência pode sofrer uma queda de até 32% com a redução da velocidade do vento que ainda produzirá 170 kWh/mês).

Escolha dos painéis: Aqui a escolha permanece a mesma, já que $170/720 = 236W$. Este valor é muito parecido com aquele utilizado anteriormente no dimensionamento dos painéis (256,5W), com uma diferença inferior a 8%. A decisão segue então os mesmos critérios já apresentados:

Tabela 8 – Matriz de decisão dos painéis

	Potência (5)	Preço (4)	Área (3)	Peso (2)	TOTAL
SQ160 - 11	2	2	2	1	26
-10	5	5	5	4	68
SX120U - 14	1	2	1	1	18
-13	3	4	3	5	50
SX80U - 20	2	1	1	1	19
-19	3	3	3	3	39
SX60U - 26	2	1	2	2	24
-25	3	2	3	3	38

Serão utilizados então 10 painéis modelo SQ 160 (R\$ 29.200,00).

Escolha do gerador: A escolha do gerador foi baseada na potência fornecida. Procurou-se um modelo pequeno e de uso residencial. A decisão, no entanto, não foi criteriosa como as anteriores pelo simples fato de não ser objetivo deste texto a seleção do melhor gerador disponível para o sistema, mas apenas criar um padrão de comparação dos sistemas com e sem o gerador.

O gerador utilizado é o modelo Mitsubishi 8000 SDE Sound Attenuated Fully Equiped Packaged Diesel Generator Set (8kW), que custa R\$ 21.000,00*. O modelo já tem como objetivo a redução de ruídos para ser utilizado em ambientes urbanos. O modelo tem consumo de 3 l/h*, e para gerar 160 kWh/mês, deve ser ligado por 20 horas no período. Isto representa um custo de $3 \times 20 \times 1,6 = R\$ 96,00$ por mês.

Supondo a troca do gerador ao menos uma vez durante 20 anos, os custos totais, passados para o presente são R\$ 36.444,83.

O sistema final, composto pelo aquecimento de água térmico, 10 painéis solares modelo SQ 160, um turbina eólica modelo Bergey BWC XL.1 e um gerador a diesel modelo Mitsubishi 8000 SDE (8kW) gera em torno de 505 kWh/mês (considerando grandes perdas no sistema eólico, o que pode ser contornado com uma maior utilização do gerador) e custa R\$ 97.113,23 (considerando R\$ 22.500,00 do banco de baterias somado ao inversor de corrente, que são os mesmos).

É extremamente importante que se tenha em mente que o resultado acima poderia variar consideravelmente, tanto para um valor maior quanto para um valor menor. Esta variação, no entanto, é difícil de se quantificar. Supondo que o gerador fosse utilizado durante 50 horas mensais, e não somente 20. Este geraria, sozinho, 400 kWh/mês. A energia de responsabilidade dos sistemas eólico e solar cairia para 380 kWh/mês, quantidade esta que poderia ser gerada por equipamentos bem menos sofisticados. No entanto, conforme mencionado no decorrer do texto, o objetivo deste estudo é a utilização de formas de energia que sejam renováveis e reduzam ao máximo a agressão ao meio. A inclusão do gerador a diesel, além de inserir um componente poluidor no sistema, ainda trás consigo a geração de ruídos, por melhor que seja o revestimento acústico do projeto.

8. Conclusões e Análises

Após análise cuidadosa das informações coletadas, foi possível atingir os objetivos esperados. O fato do projeto ter se mostrado inviável economicamente não quer dizer que o sistema seja impraticável. No Brasil, tanto o potencial eólico quanto o solar são enormes, mas mal aproveitados. Isto não é só devido ao custo ainda elevado de sistemas deste tipo, mas principalmente por um questão de cultura da população do país. O trabalho mostrou que é possível manter uma residência de 4 pessoas na cidade de São Paulo, com consumo médio de 780 kWh/mês, através de um sistema híbrido de fornecimento de energia. Com um custo estimado de R\$ 83.302,80, é possível instalar um sistema composto de aquecimento térmico da água, células fotovoltaicas e uma turbina eólica, o qual tem uma vida útil de 20 anos. No mesmo período, verificou-se que o gasto com energia comum de concessionárias seria de R\$ 29.000,00, se passados todos os custos para o presente a uma taxa de juros de 1%. Apesar de custar quase três vezes mais, a grande desvantagem do sistema seria a necessidade de pagamento em um curto espaço de tempo, bem como a necessidade de considerável área livre disponível para a turbina.

Um aspecto importante do sistema é a escolha do banco de baterias. Este, formado por baterias desenvolvidas especialmente para estes tipo de aplicação, é capaz de providenciar uma autonomia de 6 dias quando completamente carregado. Embora elevem o custo final do sistema em quase um terço, as baterias também possuem vida útil de 20 anos, descartando a necessidade de substituição das mesmas no período. Esta característica destes elementos foi fundamental na escolha dos mesmos. Os sistemas mais simples costumam utilizar baterias com vida útil em torno de 5 anos, como forma de reduzir o investimento inicial no projeto. Dado que a redução deste nunca foi o principal objetivo deste trabalho, procurou-se formas de reduzir a agressão ao meio (pois desta forma não seria necessário substituir o banco de baterias a cada 5 anos, que é o maior problema em termos ambientais do sistema em questão) e ainda foi possível reduzir o custo final do projeto, já que três trocas do banco de baterias (no decorrer dos 20 anos) seriam extremamente caras.

Quanto ao sistema dotado somente de um gerador a diesel e sem banco de baterias, verifica-se que somente com combustível seriam gastos mais de R\$ 250.000,00 no período

de 20 anos (ou R\$ 107.181,91 se considerado seu valor presente), tornando a sua utilização como fonte de energia primária inviável. Isto por que o gerador deve estar funcionando sempre que algum elemento da residência estiver ligado. Desta forma, como este foi projetado para fornecer energia para todos os elementos da residência funcionando simultaneamente, grande parte da energia é desperdiçada caso apenas parte dos componentes estejam funcionando.

No que se refere à utilização de um sistema híbrido solar, eólico e com geração a diesel, verifica-se um ponto interessante. Com um custo final de R\$ 97.113,23, muito próximo dos R\$ 83.302,80 do sistema sem o gerador, a grande vantagem de um projeto deste tipo está justamente na possibilidade de se alterar, dentro de uma faixa, a quantidade de energia armazenada nas baterias. Em épocas nas quais o consumo ultrapasse a média, é possível aumentar o número de horas que o gerador funcionará no mês, e reduzi-lo em épocas de menor necessidade. Esta liberdade não se encontra no sistema solar/eólico. No entanto, quanto maior a utilização do gerador maior será a poluição produzida (do ar e sonora), algo inexistente no aproveitamento da energia do sol e dos ventos. Contudo, como mencionado anteriormente, o dimensionamento do sistema com geração a diesel foi pouco rigoroso justamente por não ser o foco do texto. Assim, diferentemente do sistema solar/eólico, este pode apresentar diversos tipos de construção para a mesma quantidade de energia fornecida. Os resultados obtidos sobre o assunto servem de base de comparação entre os sistemas, mas não devem ser levados como verdade absoluta, já que a parcela de utilização do gerador caberá ao usuário decidir.

Apesar do custo inicial elevado, um sistema de geração de energia híbrido, sem auxílio de um gerador a diesel, apresenta diversas vantagens que motivam a sua implementação. Entre essas vantagens pode-se citar :

- independência em relação à concessionária regional de eletricidade ;
- independência em relação a desligamentos pré-estabelecidos pela concessionária ;
- independência em relação a aumentos tarifários ;
- amplas possibilidades de variação de consumo (dentro dos limites do sistema) ;

- maior conforto pela sensação de segurança pessoal pela confiabilidade do sistema solar / eólico ;
- disponibilidade imediata em situações de emergência (raios, vandalismo, apagões, greves) ;
- "status social" (mais uma auto-afirmação pela independência energética) ;
- prazer de economizar energia elétrica convencional ;
- renovação do sistema por troca do banco de baterias a cada 20 anos.

9. Revisão Bibliográfica

- [1]. **Solar Energy Handbook**, Jan F. Kreider & Frank Kreith, MacGraw-Hill Book Company, 1979.
- [2]. **Renewable Energy**, Bent Sorensen, Academic Press, 1979.
- [3]. **Wind Turbine Technology**, Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, David A. Spera, 1994.
- [4]. **Wind Energy Systems**, Papers presented at the second international Symposium on Wind Energy, held in Amsterdam October, 1978.
- [5]. **Experiência de projetos fotovoltaicos no Estado de São Paulo : modelagem para planejamento energético em comunidades isoladas**, Ferreira, Maria Julita Guerra, Tese (Doutorado), São Paulo, 2002.
- [6]. **Inserção da energia solar fotovoltaica no Brasil**, Ferreira, Maria Julita Guerra, Dissertação (Mestrado), São Paulo, 1993.
- [7]. **Dimensionamento de fontes fotovoltaicas e eólicas com base no índice de perda de suprimento e sua aplicação para atendimento a localidades isoladas**, Fadigas, Eliane Aparecida Faria Amaral, Dissertação (Mestrado), São Paulo, 1993.
- [8]. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica (CRESESB/CEPEL).
- [9]. **Energia Solar - Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotérmoeleétrica e Fotovoltaica**, Naum Fraidenraich, Francisco Lyra.
- [10]. **I Curso sobre Eletrificação Rural com Tecnologia Fotovoltaica**, Grupo FAE / DEN (UFPE), Parte 1, 1992.
- [11]. **Photovoltaic Technology and System Design - Training Manual**, Siemens Solar Industries - Training Department, 1990, Edition 4.0
- [12]. **Ar Condicionado**, SILVA, R. B.. Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico. 1969
- [13]. **SOLETROL**. Aquecedores solares. 2000
- [14]. **Programa LUZ DO SOL**, Relatórios Internos CEPEL/ SGC.
- [15]. **THE EPPLEY LABORATORY, INC** - <http://www.eppleylab.com/>

- [16]. **INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ENERGIETECHNIK** - <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/>
- [17]. **SIEMENS SOLAR INDUSTRIES** - <http://www.siemenssolar.com/>
- [18]. **KYOCERA SOLAR INDUSTRIES** - <http://www.kyocera.de/>
- [19]. <http://www.canalenergia.com.br>
- [20]. http://www.escolavesper.com.br/energia_eletrica.htm
- [21]. <http://www.ielpr.com.br/energian/energiareidencia.htm>
- [22]. <http://www.solarshop.com.br/produtos.htm>
- [23]. http://www.amerlis.pt/pv/cap_6.html
- [24]. <http://store.aapspower.com/4k4v1557ah.html>
- [25]. <http://www.comercialredimax.com.br/dimensionamento.html#sistema>
- [26]. <http://www.cefetsp.br/edu/sinergia/andre2.html>.