



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA - CEEI  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

## **Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica**

**Estudo sobre a viabilidade de independência energética  
através da utilização da energia solar em residências  
populares.**

**Aluno:** Rodrigo Diniz Siqueira

**Orientador:** Prof. Dr. Leimar de Oliveira

Campina Grande – PB, abril de 2008



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

## SALMO 139

Senhor, tu me sondas, e me conheces.

Tu conheces o meu sentar e o meu levantar; de longe entendes o meu pensamento.

Esquadrinhas o meu andar, e o meu deitar, e conheces todos os meus caminhos.

Sem que haja uma palavra na minha língua, eis que, ó Senhor, tudo conheces.

Tu me cercaste em volta, e puseste sobre mim a tua mão.

Tal conhecimento é maravilhoso demais para mim; elevado é, não o posso atingir.

Para onde me irei do teu Espírito, ou para onde fugirei da tua presença?

Se subir ao céu, tu aí estás; se fizer no abismo a minha cama, eis que tu ali estás também.

Se tomar as asas da alva, se habitar nas extremidades do mar, ainda ali a tua mão me guiará e a tua destra me susterá.

Se eu disser: Ocultem-me as trevas; torne-se em noite a luz que me circunda; nem ainda as trevas são escuras para ti, mas a noite resplandece como o dia; as trevas e a luz são para ti a mesma coisa.

Pois tu formaste os meus rins; entreteceste-me no ventre de minha mãe.

Eu te louvarei, porque de um modo tão admirável e maravilhoso fui formado; maravilhosas são as tuas obras, e a minha alma o sabe muito bem.

Os meus ossos não te foram encobertos, quando no oculto fui formado, e esmeradamente tecido nas profundezas da terra.

Os teus olhos viram a minha substância ainda informe, e no teu livro foram escritos os dias, sim, todos os dias que foram ordenados para mim, quando ainda não havia nem um deles.

E quão preciosos me são, ó Deus, os teus pensamentos! Quão grande é a soma deles!

Se eu os contasse, seriam mais numerosos do que a areia; quando acordo ainda estou contigo.

Oxalá que matasses o perverso, ó Deus, e que os homens sanguinários se apartassem de mim, homens que se rebelam contra ti, e contra ti se levantam para o mal.

Não odeio eu, ó Senhor, aqueles que te odeiam? e não me aflijo por causa dos que se levantam contra ti?

Odeio-os com ódio completo; tenho-os por inimigos.

Sonda-me, ó Deus, e conhece o meu coração; prova-me, e conhece os meus pensamentos; vê se há em mim algum caminho perverso, e guia-me pelo caminho eterno.

Dedico este trabalho aos meus pais, Joseildo e Josenilda,  
pelo apoio, carinho e compreensão nos momentos difíceis.

## Agradecimentos

Agradeço a Deus pela força e coragem para vencer. Para não correr o risco da injustiça, agradeço de antemão a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem eu sou hoje.

Agradeço, também, ao Prof. Leimar de Oliveira pela oportunidade e apoio para a realização desse sonho.

## Sumário

<b>Capítulo 1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação.....	1
<b>Capítulo 2. Tipos de Energia Solar.....</b>	<b>2</b>
2.1. Energia Solar Fototérmica.....	2
2.2. Energia Solar Fotovoltaica.....	2
<b>Capítulo 3. Radiação Solar.....</b>	<b>2</b>
3.1. Radiação Solar: Captação e Conversão.....	3
3.2. Radiação Solar no Nível do Solo.....	4
<b>Capítulo 4. Solarimetria e Instrumentos de Medição .....</b>	<b>6</b>
4.1. Piranômetros.....	6
4.2. Pireliômetros.....	7
4.3. Heliógrafo.....	8
4.4. Actinógrafo.....	8
<b>Capítulo 5. Energia Solar Fotovoltaica.....</b>	<b>9</b>
5.1. Efeito fotovoltaico.....	9
5.2. Tipos de Células.....	11
5.2.1. Silício Monocristalino.....	11
5.2.2. Silício Policristalino.....	12
5.2.3. Silício Amorfo.....	13
5.3. Módulos Fotovoltaicos.....	13
5.3.1. Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos.....	15
5.3.2. Fatores que Afetam as Características Elétricas dos Módulos.....	16
5.3.3. Alguns Modelos de Módulos Fotovoltaicos.....	17
<b>Capítulo 6. Componentes de um Sistema Fotovoltaico.....</b>	<b>18</b>
6.1. Sistemas Isolados.....	18
6.2. Sistemas Híbridos.....	19
6.3. Sistemas Interligados à Rede.....	19
<b>Capítulo 7. Projeto de utilização em residências populares.....</b>	<b>20</b>
7.1. Princípios do Dimensionamento.....	20
7.1.1. Quantidade de energia necessária.....	21
7.1.2. Quantidade de energia produzida pelo módulo solar.....	21
7.1.3. Carga do sistema de Potência Elétrica Solar.....	21
7.2. Sistema Utilizado.....	23
<b>Capítulo 8. Conclusão.....</b>	<b>25</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>27</b>

# CAPÍTULO I

## 1. Introdução

### INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje 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 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.

Nesse trabalho, procuro mostrar dados que possibilitem uma compreensão sobre o funcionamento e o uso da energia solar em residências, os custos dessas instalações e situações onde esse tipo de energia renovável pode ser eficientemente utilizada.

No capítulo 2, serão mostradas os tipos de energia solar, as mais utilizadas, os modos de captação e as formas de uso desses tipos de energia.

No capítulo 3, descrevo a radiação solar, a forma de captação e conversão dessa radiação em outro tipo de energia, em especial a energia elétrica.

No capítulo 4, falo sobre os instrumentos de medida utilizados para medir algumas características da radiação solar, como exemplo: a intensidade e a distribuição espectral e angular.

No capítulo 5, descrevo a energia solar fotovoltaica, através do processo de conversão da energia solar em energia elétrica, os tipos de células solares, os tipos e configurações dos painéis solares.

No capítulo 6, apresento os componentes e os tipos de sistemas fotovoltaicos.

No capítulo 7, mostro o projeto de instalação em residências populares com os princípios de dimensionamento e os custos dessas instalações.

No capítulo 8, apresento minhas conclusões sobre a utilização da energia solar em residências populares.

### 1.1. Motivação

O que me induziu a fazer esse trabalho sobre energia solar foi a grande curiosidade de saber porque uma fonte de energia tão abundante na natureza, ecologicamente correta e renovável não é utilizada em larga escala na nossa sociedade. Principalmente numa época em que enfrentamos grandes problemas de degradação e alterações ambientais. Também com o intuito de desenvolver idéias para o uso dessa forma de energia em comunidades carentes situadas em regiões remotas.

## 2. Tipos de Energia Solar

### 2.1. 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 se 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, hoje, largamente utilizados para aquecimento de água em residências, hospitais, hotéis, etc. devido ao conforto proporcionado e a redução do consumo de energia elétrica.

### 2.2. 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 ao daquelas 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.

## 3. Radiação Solar

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre,  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia. Trata-se de um valor considerável, correspondendo a quase 10000 vezes o

consumo mundial de energia neste período. Este fato vem indicar que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (térmica, elétrica, etc.).

Uma das possíveis formas de conversão da energia solar é conseguida através do efeito fotovoltaico que ocorre através das células fotovoltaicas.

### 3.1. Radiação Solar: Captação e Conversão

O nosso planeta, em seu movimento anual em torno do Sol, descreve em trajetória elíptica um plano que é inclinado de aproximadamente  $23,5^\circ$  com relação ao plano equatorial. Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias, dando origem às estações do ano e dificultando os cálculos da posição do Sol para uma determinada data, como pode ser visto na figura 3.1.

A posição angular do Sol, ao meio dia solar, em relação ao plano do Equador (Norte positivo) é chamada de Declinação Solar ( $\delta$ ). Este ângulo, que pode ser visto na figura 3.1, 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 na Terra.

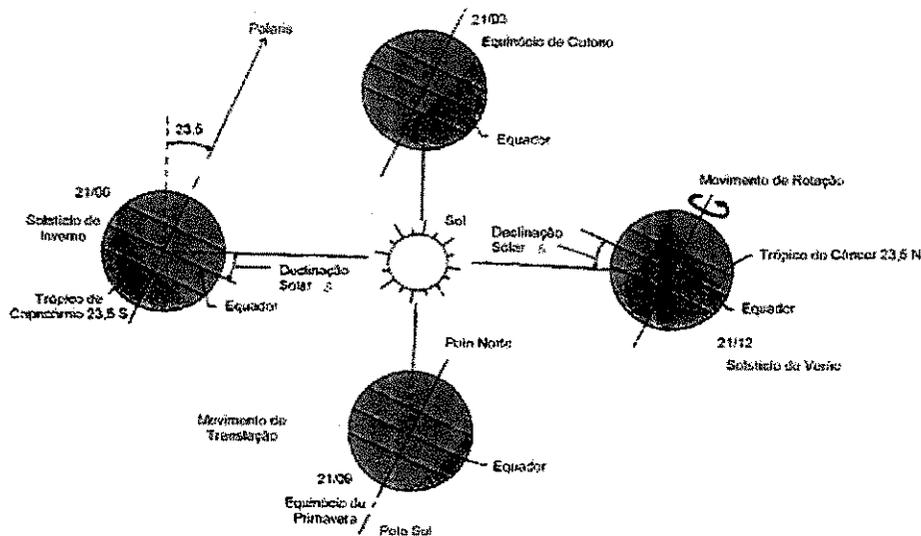


Figura 3.1 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de  $23,5^\circ$ .

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar que é uma camada tênue com aproximadamente 300 km de espessura e temperatura superficial da ordem de 5800 K. Porém, esta radiação não se apresenta como um modelo de regularidade, pois há a influência das camadas externas do Sol (cromosfera e coroa), com pontos quentes e frios, erupções cromosféricas, etc. Apesar disto, pode-se definir um valor médio para o nível de radiação solar incidente normalmente sobre uma superfície situada no topo da atmosfera.

A radiação solar é a 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  $0,1\mu\text{m}$  a  $5\mu\text{m}$ , tendo uma máxima densidade espectral em  $0,5\mu\text{m}$ , 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 reflexão e, na faixa de  $0,75$  a  $100\mu\text{m}$ , correspondente ao infra-vermelho, as propriedades de absorção, reflexão e emissão.

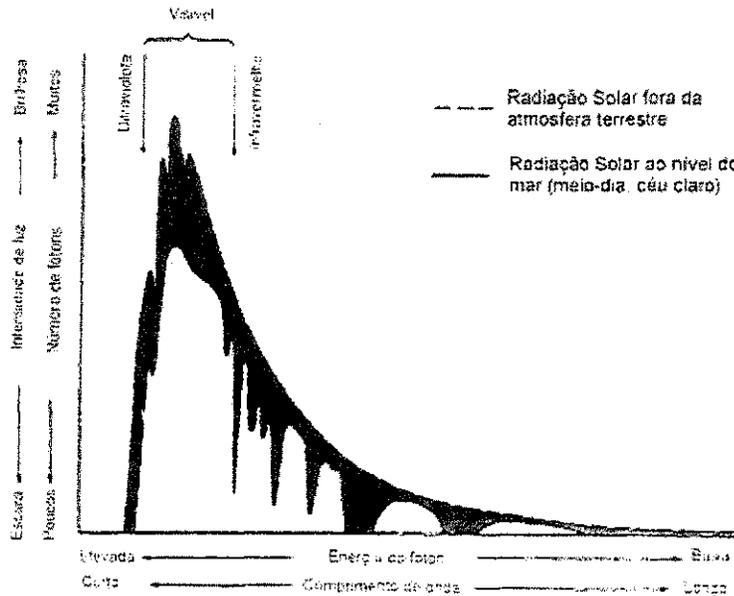


Figura 3.2 - Distribuição espectral da radiação solar.

A energia solar incidente no meio material pode ser refletida, transmitida e absorvida. A parcela absorvida dá origem, conforme o meio material, aos processos de fotoconversão e termoconversão.

### 3.2. Radiação Solar no Nível do Solo

De toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre, devido 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.

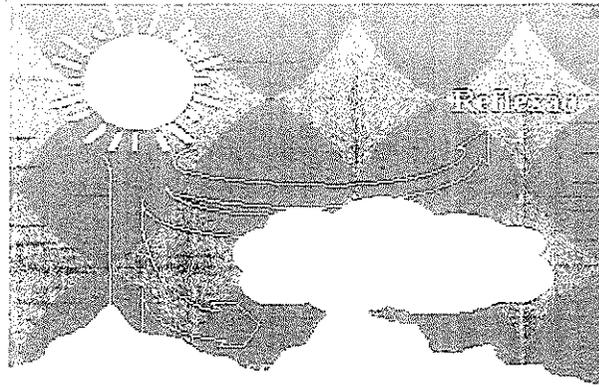


Figura 3.3 - Componentes da radiação solar ao nível do solo

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 nuvens 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.

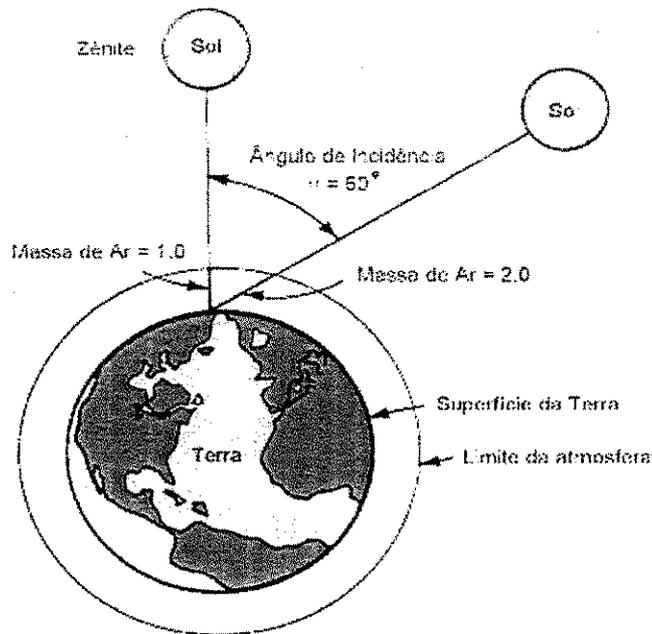


Figura 3.4 - Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de Massa de Ar (AM).

#### 4. Solarimetria e Instrumentos de Medição

A medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre é muito importante para o estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar a instalações de sistemas térmicos e fotovoltaicos em uma determinada região garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano onde, as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações.

De acordo com as normas preestabelecidas pela OMM (Organização Mundial de Meteorologia) são determinados limites de precisão para quatro tipos de instrumentos: de referência ou padrão, instrumentos de primeira, segunda e terceira classe.

As medições padrões são: radiação global e difusa no plano horizontal e radiação direta normal.

A seguir alguns instrumentos de medida da radiação são mostrados, o uso mais freqüente e a classe associada ao seu desempenho.

##### 4.1. Piranômetros

Os Piranômetros medem a radiação global. Este instrumento caracteriza-se pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco igualmente iluminada. A expansão sofrida pelas superfícies provoca uma diferença de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo da energia solar.

Um outro modelo bem interessante de piranômetro é aquele que utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para coletar medidas solarimétricas. Este piranômetro é largamente utilizado pois apresenta custos bem menores do que os equipamentos tradicionais. Pelas características da célula fotovoltaica, este aparelho apresenta limitações quando apresenta sensibilidade em apenas 60% da radiação solar incidente.

Existem vários modelos de piranômetros de primeira (2% de precisão) e também de segunda classe (5% de precisão), modelos de diversos fabricantes entre eles podemos citar: Eppley 8-48 (USA), Cimel CE-180 (França), Schenk (Áustria), M-80M (Rússia), Zonen CM5 e CM10 (Holanda).

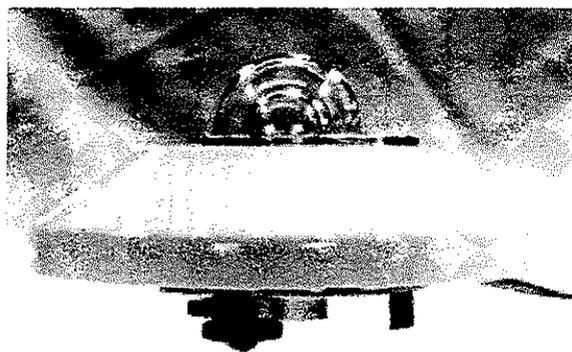


Figura 4.1 - Piranômetro de Segunda Classe

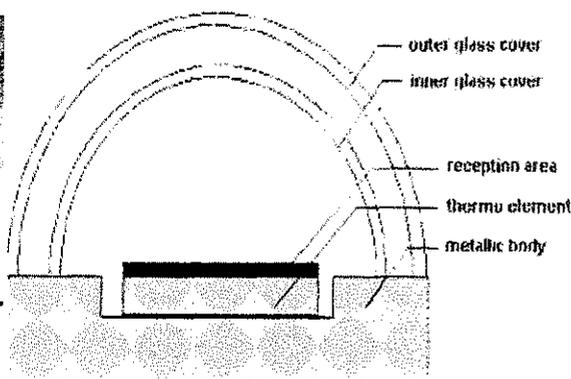


Figura 4.2 - Secção transversal de um piranômetro

## 4.2. Pireliômetros

O pireliômetro é um instrumento que mede a radiação direta. Ele se caracteriza por apresentar uma pequena abertura de forma a visualizar apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento segue o movimento solar onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor. Muitos dos pireliômetros hoje são autocalibráveis apresentando precisão na faixa de 5% quando adequadamente utilizados para medições.



Figura 4.3 - Pireliômetros de Cavidade Absoluta



Figura 4.4 - Pireliômetros de Incidência Normal

### 4.3. Heliógrafo

O Heliógrafo é um instrumento que registra a duração do brilho solar. A radiação solar é focalizada por uma esfera de cristal de 10 cm de diâmetro sobre uma fita que, pela ação da radiação é enegrecida. O comprimento desta fita exposta à radiação solar mede o número de horas de insolação.



Figura 4.5 - Heliógrafo Capbell-Stokes

### 4.4. Actinógrafo

Actinógrafo é um instrumento usado para medir a radiação global. Este instrumento é composto de sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico. Os sensores são conectados a uma pena, quando ela expande os sensores registram o valor instantâneo da radiação solar. Sua precisão encontra-se na faixa de 15 a 20% e é considerado um instrumento de terceira classe.



Figura 4.6 - Actinógrafo Robitzsch-Fuess

## 5. Energia Solar Fotovoltaica

A conversão de energia solar em energia elétrica foi verificada pela primeira vez por Edmond Becquerel, em 1839, onde constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor quando exposto a luz. Em 1876 foi montado o primeiro aparato fotovoltaico resultado de estudos das estruturas no estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial seguindo o desenvolvimento da microeletrônica.

Neste ano a utilização de fotocélulas foi de papel decisivo para os programas espaciais. Com este impulso, houve um avanço significativo na tecnologia fotovoltaica onde se aprimorou o processo de fabricação, a eficiência das células e seu peso. Com a crise mundial de energia de 1973/74, a preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com que a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais, mas que fosse intensamente estudada e utilizada no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia.

Um dos fatores que impossibilitava a utilização da energia solar fotovoltaica em larga escala era o alto custo das células fotovoltaicas. As primeiras células foram produzidas com o custo de US\$600/W para o programa espacial. Com a ampliação dos mercados e várias empresas voltadas para a produção de células fotovoltaicas, o preço tem reduzido ao longo dos anos podendo ser encontrado hoje, para grandes escalas, o custo médio de US\$ 8,00/W.

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações. As facilidades de um sistema fotovoltaico tais como: modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica.

### 5.1. Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais 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.

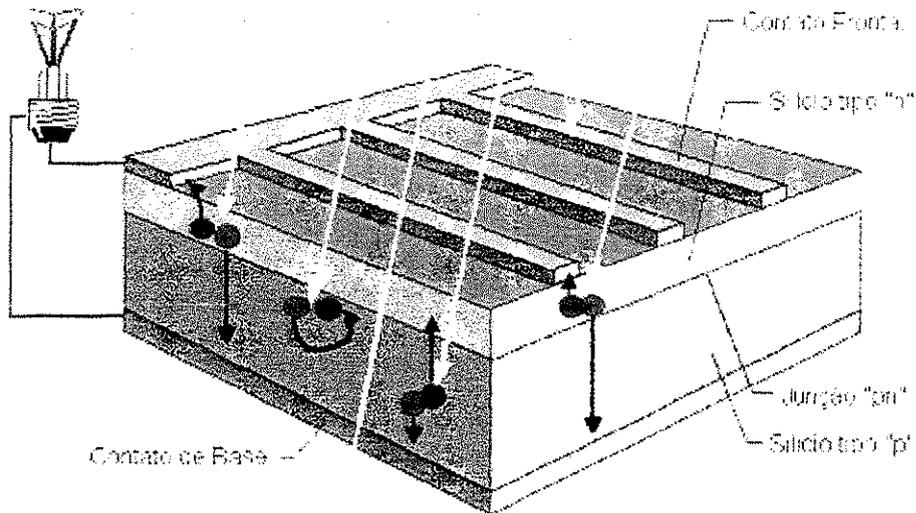


Figura 5.1 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica

Se forem introduzidos 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 uma região vizinha 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.

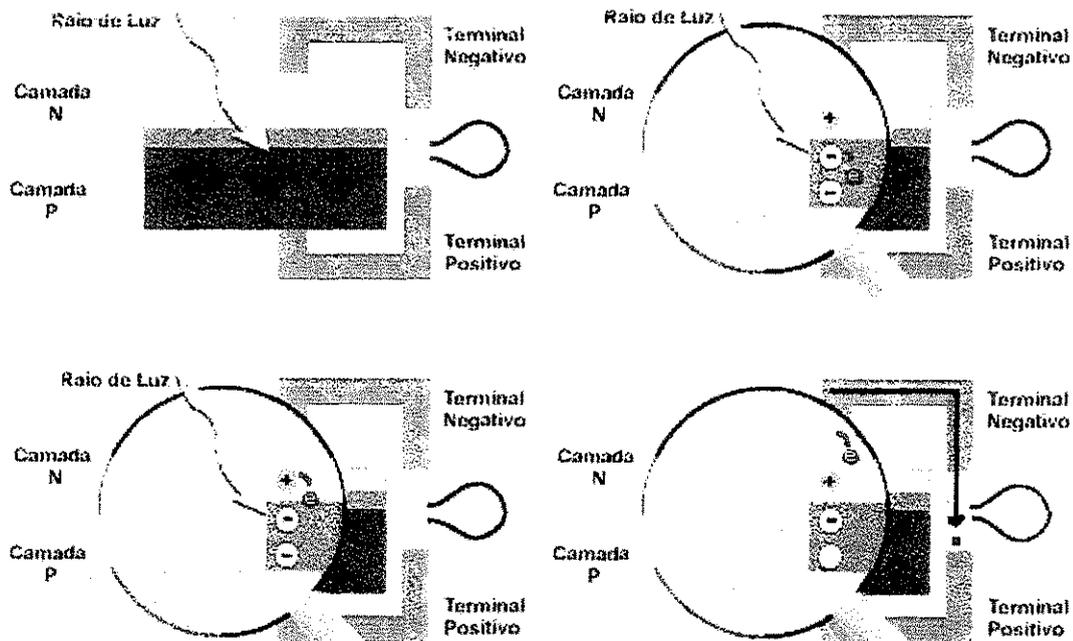


Figura 5.2 - Efeito fotovoltaico na junção pn.

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 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 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 o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas.

## 5.2. Tipos de Células

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

### 5.2.1. Silício Monocristalino

A célula de silício monocristalino é historicamente a mais usada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído.

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 em 98 e 99%, o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e de custo. Este silício para funcionar como célula fotovoltaica necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,9999%.

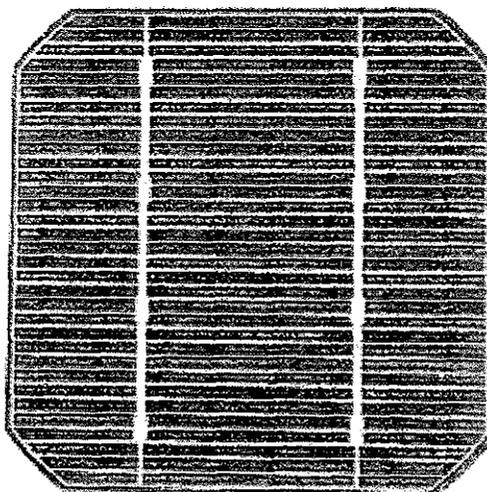


Figura 5.3 - Célula de silício monocristalino

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 $\mu$ m.

Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, devem-se introduzir impurezas do tipo n de forma a obter a junção pn. 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 a maior eficiência. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios.

### 5.2.2. Silício Policristalino

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 as células de silício monocristalino.

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

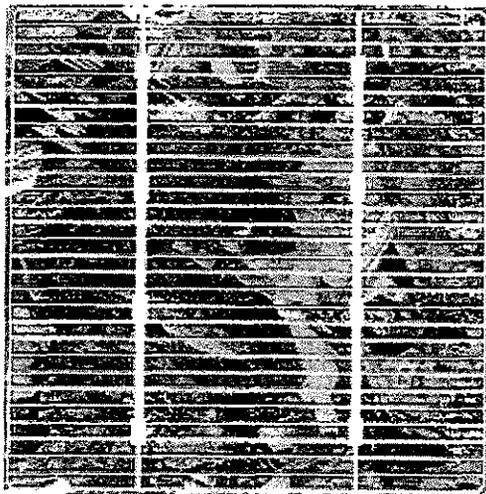


Figura 5.4 - Célula de silício policristalino

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.

### 5.2.3. 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 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; a segunda é que 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;
- baixo consumo de energia na produção.

### 5.3. 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, 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.

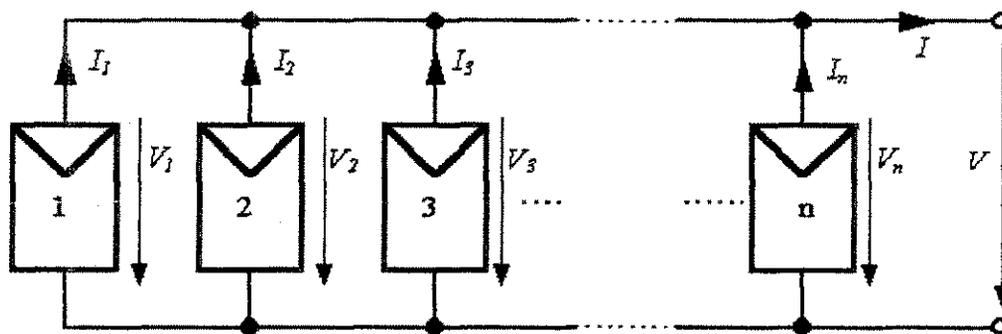


Figura 5.5 - Conexão de células em paralelo

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 12V, o que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que também funcionam na faixa dos 12V.

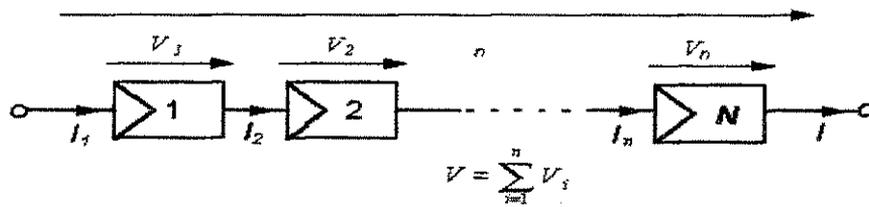


Figura 5.6 - Arranjo das células em série

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente, comprometendo todo o funcionamento das demais células no módulo, por estar ligada em série. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de baixo desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo (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 de passo é feito em grupamentos de células o que, torna muito mais barato comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula.

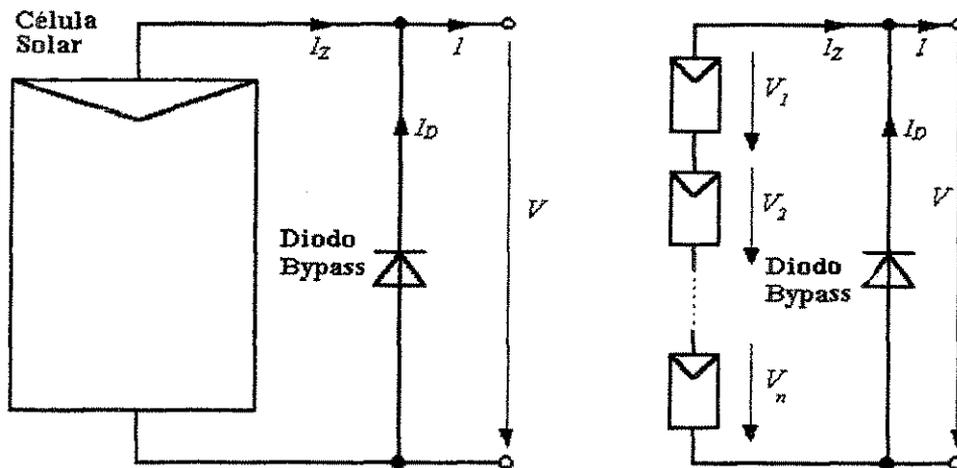


Figura 5.7 - Possível ligação para um diodo de passo entre células

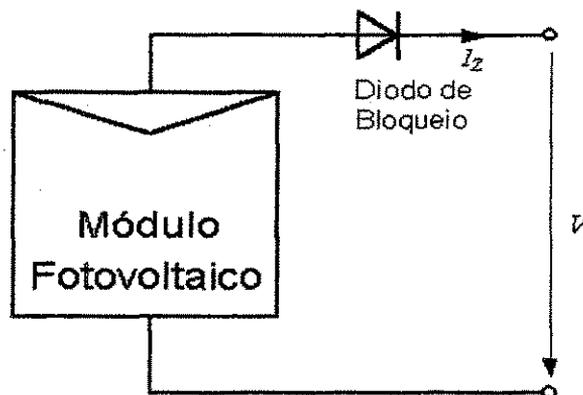


Figura 5.8 - Diodo de bloqueio

Outro problema que pode acontecer é quando surge uma 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 esse problema, usa-se um diodo de bloqueio impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria.

### 5.3.1. Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico. Existem outras características elétricas que melhor caracteriza o funcionamento 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  $1000\text{W/m}^2$  (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura).

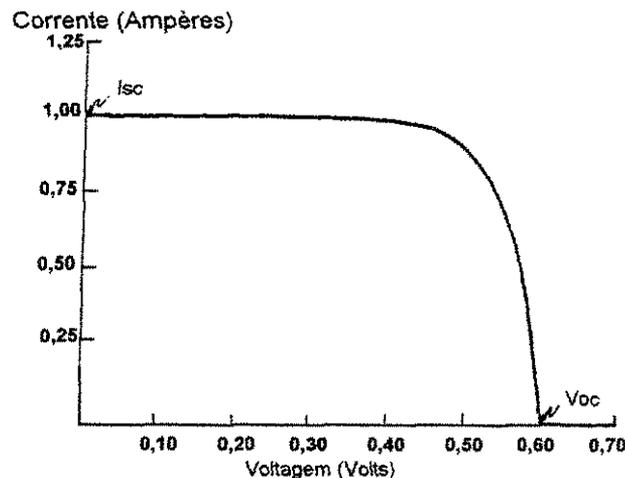


Figura 5.9 - Curva característica  $I \times V$  mostrando a corrente  $I_{sc}$  e a tensão  $V_{oc}$

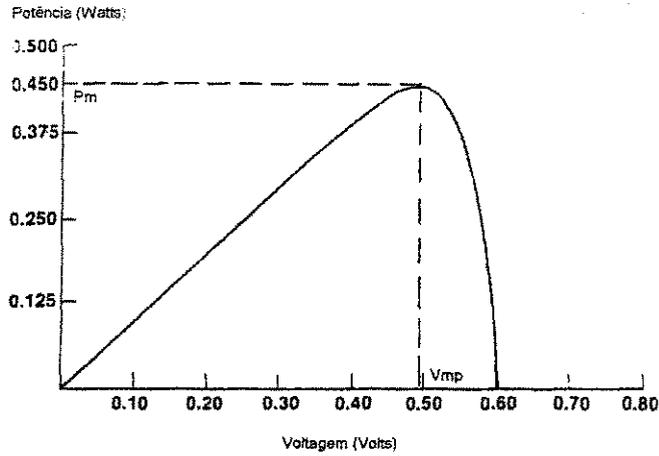


Figura 5.10 - Curva típica de potência versus tensão

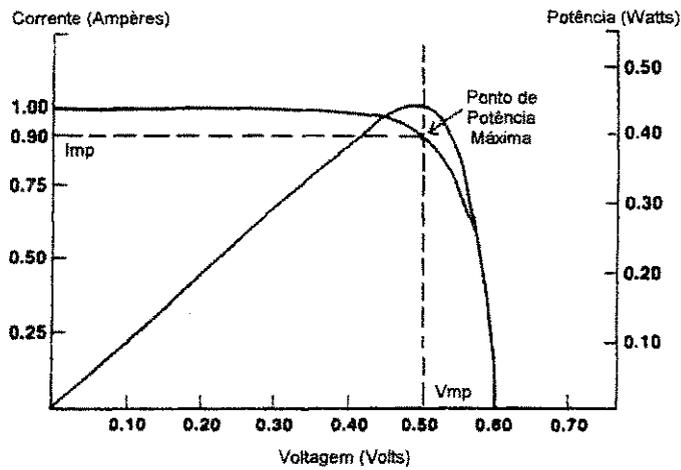


Figura 5.11 - Parâmetros de potência máxima

### 5.3.2. Fatores que Afetam as Características Elétricas dos Módulos

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.

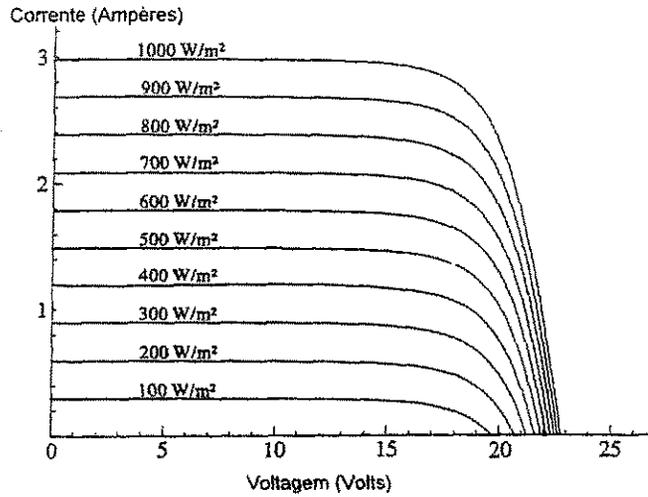


Figura 5.12 - Efeito causado pela variação de intensidade luminosa.

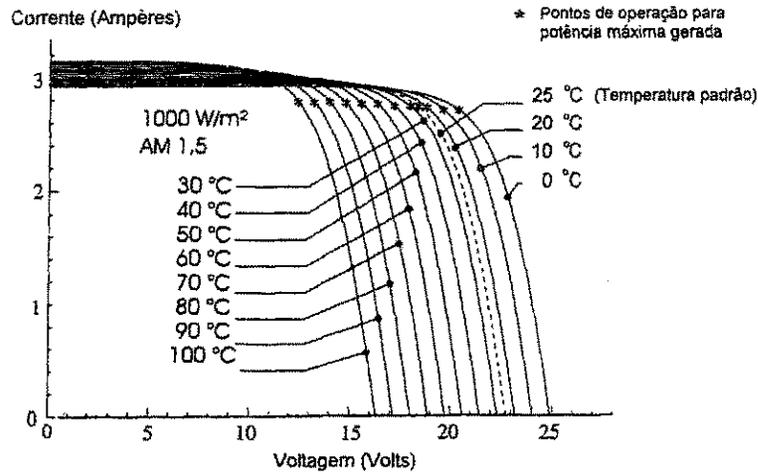


Figura 5.13 - Efeito causado pela temperatura na célula.

### 5.3.3. Alguns Modelos de Módulos Fotovoltaicos

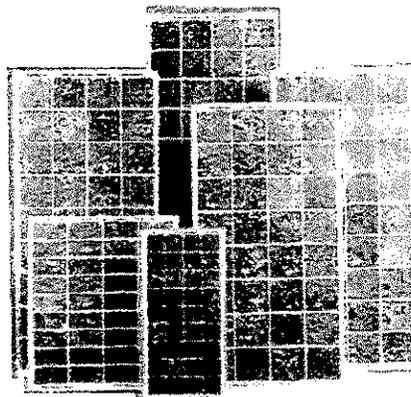


Figura 5.14 - Módulo fabricado pela empresa Kyosera.

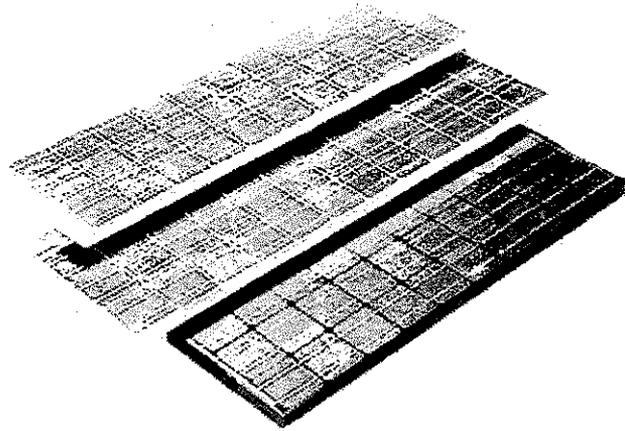


Figura 5.15 – Módulo fabricado pela empresa Siemens

## 6. Componentes de um 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.

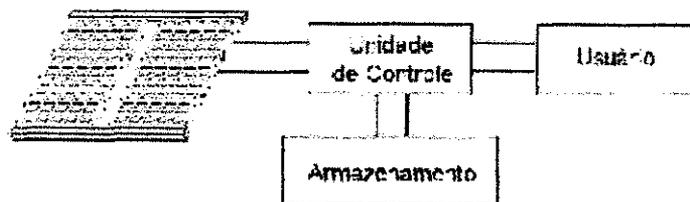


Figura 6.1 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico.

### 6.1. Sistemas Isolados

Os 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. 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 que necessitam de armazenamento de energia em baterias, usa-se um dispositivo para controlar a carga e a descarga na bateria. O “controlador de carga” tem como principal função não deixar que haja 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.

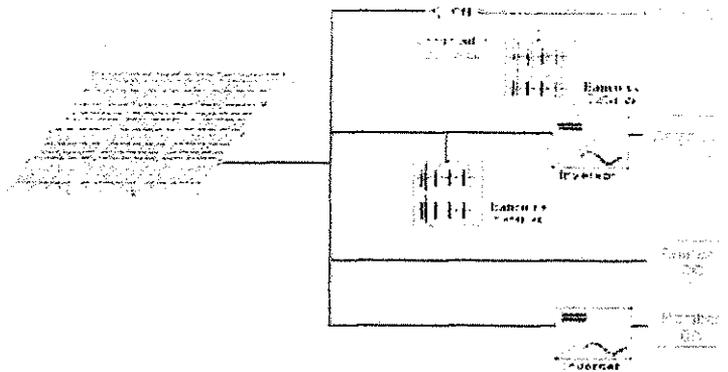


Figura 6.2 - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada.

## 6.2. Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são aqueles que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia como, por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica, com a finalidade de otimização do uso das energias, torna-se complexa. É necessário um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário.

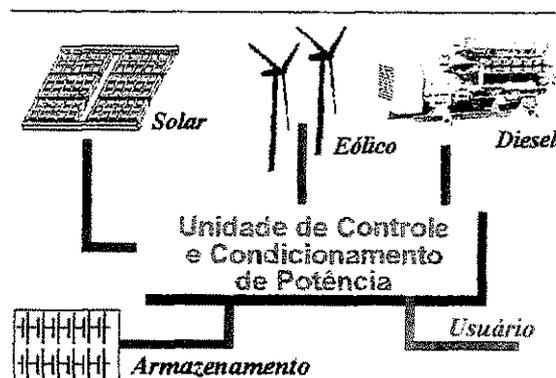


Figura 6.3 - Exemplo de sistema híbrido.

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.

## 6.3. Sistemas Interligados à Rede

Estes sistemas 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 esta conectada. Todo o arranjo é conectado à inversores e logo em seguida guiados diretamente para rede. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada.

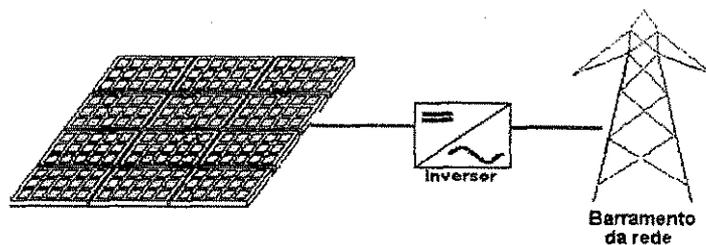


Figura 6.4 - Sistema conectado à rede.

## 7. Projeto de utilização em residências populares

A participação estatal é fundamental na concretização de um modelo viável de geração descentralizada. Neste modelo entram diversos incentivos como os financiamentos para a instalação de centrais domésticas de geração, a compra pela concessionária da energia excedente produzida nas residências (eliminando assim a necessidade de armazenamento) e a assessoria técnica sempre disponível para suprir as dificuldades de instalações complexas. Mas essa participação não é o único fator determinante deste possível modelo. A evolução tecnológica dos equipamentos, a formação de mão-de-obra especializada e principalmente a pesquisa das interfaces técnicas em nível de projeto, são outros fatores que determinariam uma possível viabilidade do sistema.

No Brasil, ainda não se podem instalar sistemas interligados, dado a inexistência de infra-estrutura das concessionárias de energia.

Para a energia solar o máximo rendimento teórico de uma célula de silício é de 45-50%, estando a eficiência máxima alcançada pela indústria comercialmente entre 10 e 15%. A eficiência é uma variante que influi em todo o sistema. Assim, não é bastante se ter um gerador eficiente se os equipamentos que se utilizam da energia gerada não o são.

### 7.1. Princípios do Dimensionamento

O dimensionamento de um sistema de potência elétrica solar determina qual a quantidade de energia é necessária para determinada aplicação e quantos módulos são necessários para fornecer essa demanda energética.

Um sistema de potência solar deve fornecer a quantidade de energia necessária para atender ao consumo diário dos equipamentos e utensílios elétricos que são por ele alimentados, e ainda incluir uma compensação da energia consumida pelo próprio sistema.

### 7.1.1. Quantidade de energia necessária

A Energia necessária é calculada em função da carga a qual será submetido o sistema de potência. A unidade utilizada é watt-hora. Isto representa a potência nominal dos equipamentos e utensílios (watts) multiplicado pelo tempo médio (horas) de operação diária dos utensílios e equipamentos.

Além da carga dos equipamentos e utensílios, o sistema também consome parte da energia produzida em sua operação. Por exemplo, deve-se evitar o retorno da energia estocada na bateria sobre o módulo; o inversor consome energia para converter a corrente contínua CC em corrente alternada AC; parte da energia é perdida por efeito joule na linha de transmissão. Então, deve-se acrescentar no dimensionamento do sistema um fator que represente esta carga própria do funcionamento do sistema.

### 7.1.2. Quantidade de energia produzida pelo módulo solar

A energia que é produzida pelo módulo depende de vários fatores: eficiência de conversão das fotocélulas que compõem o módulo, localização geográfica do sistema, eficiência da instalação e mudanças climáticas da região. A eficiência das fotocélulas varia de acordo o fabricante ou com material utilizado na sua fabricação. Dessa forma, o comprador pode escolher os sistemas mais eficientes em função das suas possibilidades financeiras. Assim, pode-se estimar qual a energia fornecida pelo sistema multiplicando a potência nominal do módulo por um fator de área (que inclui a geografia local, condições climáticas, incidência média de radiação solar, etc.). O resultado fornece a energia elétrica média (watt-horas) produzida por dia pelo módulo solar. O número de módulos necessários é baseado neste cálculo.

### 7.1.3. Carga do sistema de Potência Elétrica Solar

A seguir é mostrado um projeto básico para a instalação de um sistema de potência elétrica fotovoltaica para suprir a demanda de uma residência popular, realizado pelo Laboratório de energia solar da UFSC.

Considerações para o dimensionamento:

Itens	Potência média (W)	Quantidade	Tempo médio (horas)	Consumo médio Diário (KW/h)
Geladeira	200	1	10	2
TV cores 20"	90	1	5	0,45
Lâmpada Fluorescente (32W; c/reator)	47	6	3	0,846

Liquidificador	100	1	1	0,1
Ventilador	100	1	5	0,1
Aparelho de	20	1	4	0,08
Som				
TOTAL				3,576

Tabela 7.1 – Dimensionamento do sistema

O sistema será composto por:

- 15 módulos solar, potência mínima 50 W, 12 V, 2.3 A, assim instalados : 5 em séries por 3 em paralelos;
- 1 bateria de 88 Amp.h;
- inversor corrente CC para Corrente AC;
- controlador de carga;
- Estrutura metálica;
- Fios;
- Área de 7 m<sup>2</sup> para instalação dos módulos.

O orçamento desse sistema é mostrado na tabela abaixo:

Componentes	Quantidade	Preço unitário(R\$)	Total
Módulo solar	15	500,00	7.500,00
Inversor CC/AC	01	2.400,00	2.400,00
Bateria	01	160,00	160,00
Controlador de carga	01	140,00	140,00
Projeto do Sistema			1.200,00
Total (R\$)			11.400,00

Tabela 7.2 – Orçamento do sistema

O preço médio para a instalação de um sistema fotovoltaico para uma residência com eletrodomésticos básicos ficaria próximo de R\$ 11.400,00, o que seria economicamente inviável para a maioria dos consumidores brasileiros. Pois a renda per capita no Brasil varia entre R\$ 380,00 e R\$ 620,00 (camada média média). Esse estudo mostra a necessidade da grande participação estatal não só no financiamento da instalação, mas também na implantação de uma estrutura na matriz energética que permitisse a interligação do sistema solar instalado nas residências à rede convencional. Como também incentivos à pesquisa e desenvolvimento na área de componentes do sistema fotovoltaico para diminuir custos de instalação e aumentar a eficiências de tais componentes desse sistema.

Para comparação do custo desse projeto básico com os preços praticados no mercado, atualmente, é apresentado um orçamento feito no site da Solar Brasil com uma configuração aproximada da que é mostrada no projeto acima.

Equipamentos:	Consumo Ah	X Quant	X N° horas	Total
TV Colorida 29" c/ Parabólica + Inversor 110V	15,00			0
TV Colorida 20" c/ Parabólica + Inversor 110V	8,00	1	10	80
TV Colorida 14" c/ Parabólica + Inversor 110V	6,00			0
Rádio AM/ FM Toca Fitas/ CD 12V	2,00	1	5	10
Rádio Intercomunicador 12V	2,00			0
Rádio Tel (transmitindo /standbay) 12V	12,00			0
Telefone Rural Cel (transmitindo/ standbay 12V)	4,00			0
Microcomputador 110V + Inversor	8,00			0
Impressora normal 110V + Inversor	8,00			0
Batedeira 110V ou Liquidificador 110V	26,00	1	0,5	13
Ventilador de Teto pequeno 110V + Inversor	4,00			0
Ventilador de Mesa pequeno 110V + Inversor	3,00	1	5	15
* Lâmpada 9W 12V = 60W 110/220V	0,75			0
* Lâmpada Fluorescente 22W 12V	1,30	6	3	24
* Lâmpadas recomendadas: Fluorescentes e Compactas 12V				
<b>TOTAL Ah/dia:</b>				<b>142</b>

	Orçamento Diversos Equipamentos:	Valor Unit. R\$	Valor Total R\$
4	* Módulo Solar Fot. Kyocera KC130 Watts (gera 37 X 4 = 148 Ah/dia)	1.700,00	6.800,00
2	Controlador de Carga Nacional 30 Amperes 12 Volts	220,00	440,00
2	Inversor 12V p/ 110V Importado Mod. 700 Xantrex	320,00	640,00
6	Lâmpada 22W Fluorescente Circular 12V c/ soquete	25,00	150,00
	<b>TOTAL R\$</b>		<b>8.030,00</b>

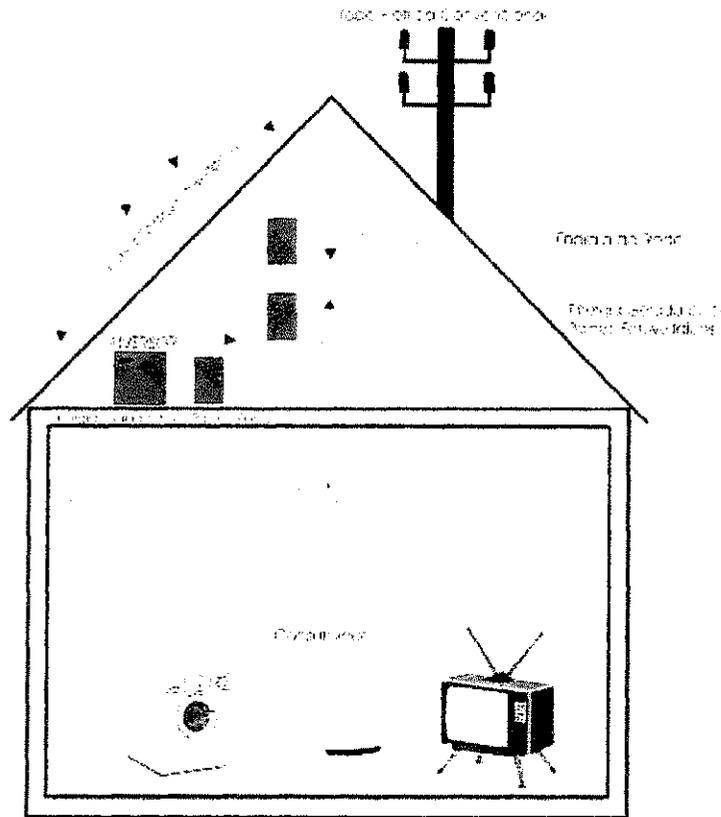
## 7.2. Sistema Utilizado

O sistema que melhor se aplicaria a esse tipo de projeto seria o Sistema interligado à rede elétrica, o que possibilitaria dispensar o uso de acumuladores, pois atuam como usinas geradoras de energia elétrica em paralelo às grandes centrais geradoras.

Em sistemas fotovoltaicos residenciais interligados à rede elétrica, sempre que o sistema gera energia em excesso em relação ao consumo da residência, este excesso é injetado diretamente na rede elétrica pública (o relógio medidor de consumo "anda para trás"; a residência está "vendendo" energia para a rede). Quando o sistema fotovoltaico gera menos energia do que a necessária para atender à demanda da residência (períodos de elevado consumo elétrico, ou baixa incidência solar, ou à noite), então a energia complementar necessária é extraída da rede. Este sistema solar dispensa assim o uso de baterias, pois utiliza a rede elétrica como armazenador de energia. Além disto, não necessita ser superdimensionado para atender aos picos de consumo da residência em função de sempre dispor da rede elétrica como apoio.

Em centros urbanos, o uso intensivo de aparelhos de ar-condicionado para refrigeração de ambientes coincide com a maior oferta solar e, portanto, com máximos na geração fotovoltaica. A geração fotovoltaica pode neste caso apresentar vantagens à concessionária elétrica local, no sentido de aliviar picos de consumo na rede, aumentando assim a vida útil do sistema de transmissão e distribuição e adiando os

grandes investimentos e longos prazos de instalação envolvidos na construção de centrais elétricas convencionais.



**Figura 7.1 - Diagrama esquemático de um sistema solar fotovoltaico integrado ao telhado de uma residência urbana e interligado à rede elétrica convencional. O relógio medidor 1 (kWh 1) mede a energia gerada pelo sistema solar; o relógio medidor 2 (kWh 2) mede a energia gerada pelo sistema solar que é exportada para a rede elétrica; o relógio medidor 3 (kWh 3) mede a energia importada da rede elétrica.**

O projeto de instalação de redes fotovoltaicas pode ser bem aproveitado em comunidades remotas, onde o custo de instalação de uma rede convencional seria muito alto. A rede fotovoltaica deve ser preparada para uma futura interligação à rede convencional. Uma configuração alternativa para esse tipo de sistema é mostrada na figura abaixo:

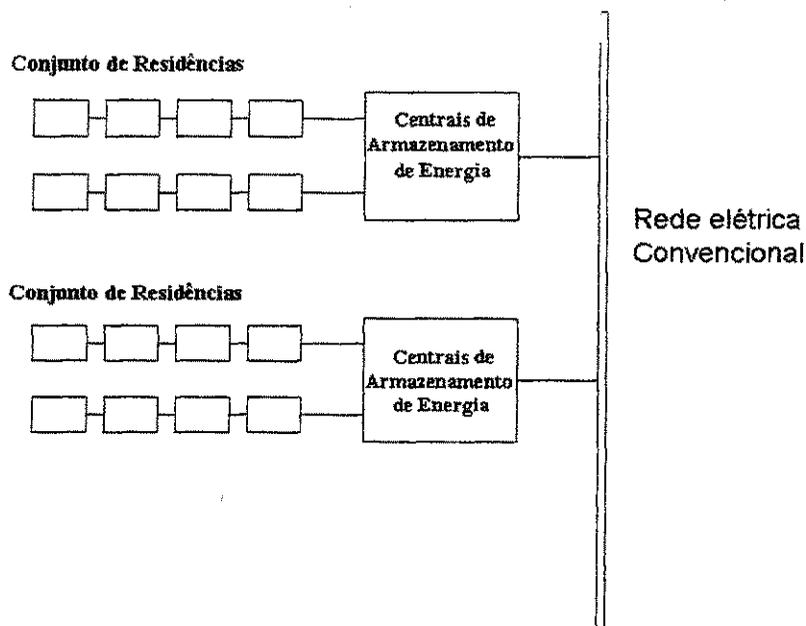


Figura 7.2 – Configuração alternativa para o sistema interligado à rede elétrica.

Nesse sistema, centrais de armazenamento de energia são usadas entre as residências e a rede elétrica convencional.

Em países da Europa, em especial na Alemanha, a experiência de utilização da energia solar interligada à rede vem sendo implementada com bastante êxito, graças a participação estatal na concretização de um modelo viável de geração descentralizada. Neste modelo entram diversos incentivos como o financiamento para a instalação de centrais domésticas, a compra pela concessionária da energia excedente produzida na edificação e a assessoria técnica sempre disponível para suprir as dificuldades de instalações complexas.

## CAPÍTULO VIII

### 8. Conclusão

A urgência de se estabelecer uma política governamental com relação ao futuro da utilização das energias renováveis fica clara na medida em que os recursos tecnológicos disponíveis vão viabilizando modelos sustentáveis de utilização destas energias, seja no sistema interligado ou de sistemas autônomos.

A utilização de energias renováveis em sistemas autônomos envolve questões relativas à viabilidade financeira e à viabilidade técnica das instalações. Os altos custos envolvidos nas instalações autônomas são, na maioria dos casos, proibitivos para boa parte da população em geral. Este quadro tende a mudar na medida em que a participação governamental viabilize, através de incentivos diversos, o barateamento do preço dos equipamentos e a conseqüente redução do custo final de implantação.

Para que potenciais usuários tomem conhecimento das potencialidades desta alternativa energética, se torna necessário que a energia solar fotovoltaica alcance um

maior nível de disseminação, de modo que os tomadores de decisão estejam informados acerca das alternativas existentes. Este trabalho dirige seus esforços neste sentido. O caráter renovável e não-poluinte da energia solar fotovoltaica tende a tornar esta forma de geração de energia mais e mais viável, em função das transformações pelas quais passam as sociedades modernas. Com a perspectiva de atingir custos comparáveis aos dos métodos convencionais de geração elétrica nos próximos anos, a energia solar fotovoltaica deverá penetrar os mercados de forma mais acentuada e garantir um lugar de destaque na geração de energia elétrica em nosso país.

## **Bibliografia**

ACIOLI, J. **Fontes de energia**, Editora UnB, Brasília, 1993.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. E.Blücher, São Paulo, 1999.

JANNUZZI, G. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos**. Autores Associados, Campinas, São Paulo, 1997.

LAMBERTS, R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. PW Editores Associados, São Paulo, 1997.

PALZ, W. **Electricidad solar**, Editorial Blume, Barcelona, 1978

RÜTHER, R. **Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e o trabalho do Labsolar nesta área**. Fontes não-convencionais de energia. Labsolar, Florianópolis, 2000.