

*Centro de Referência para Energia Solar
e Eólica Sérgio de Salvo Brito*



***ENERGIA SOLAR
PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES***

<http://www.cresesb.cepel.br>

E-mail: crese@cepel.br

CEPEL 
SISTEMA ELETROBRÁS

ENERGIA SOLAR - PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES

1. INTRODUÇÃO	4
1.1. Energia Solar Fototérmica	4
1.2. Arquitetura Bioclimática	4
1.3. Energia Solar Fotovoltaica	5
2. RADIAÇÃO SOLAR	6
2.1. Radiação Solar: Captação e Conversão	6
2.2. Radiação Solar a Nível do Solo	8
3. SOLARIMETRIA E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	10
3.1. Piranômetros	10
3.2. Pireliômetros	11
3.3. Heliógrafo	11
3.4. Actinógrafo	11
4. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	12
4.1. Efeito fotovoltaico	12
4.2. Tipos de Células	14
4.2.1. Silício Monocristalino	14
4.2.2. Silício Policristalino	15
4.2.3. Silício Amorfo	15
5. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	17
5.1. Características elétricas dos módulos fotovoltaicos	18
5.2. Fatores que afetam as características elétricas dos módulos	19
5.3. Alguns modelos de módulos fotovoltaicos	20
6. COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	21
6.1. Sistemas Isolados	21
6.2. Sistemas Híbridos	22
6.3. Sistemas Interligados à Rede	23
7. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO BRASIL	24
7.1. Sistema de Bombeamento Fotovoltaico para Irrigação	24
7.2. Sistema de Eletrificação Residencial no Ceará	24
7.3. Sistema Híbrido (Solar- Eólico-Diesel)	26
7.4. Sistema Fotovoltaico em Parques Ecológicos	27
7.5. Sistema de Telefonia Pública utilizando Energia Fotovoltaica em Maceió-AL	27
8. BIBLIOGRAFIA	28



1. Introdução

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, 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 (hidroeleticidade). 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.

Algumas formas de utilização da energia solar são apresentadas a seguir.

1.1. 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.

1.2. Arquitetura Bioclimática

Chama-se arquitetura bioclimática o estudo que visa harmonizar as construções ao clima e características locais, pensando no homem que habitará ou trabalhará nelas, e tirando partido da energia solar, através de correntes convectivas naturais e de microclimas criados por vegetação apropriada. É a adoção de soluções arquitetônicas e urbanísticas adaptadas às condições específicas (clima e hábitos de consumo) de cada lugar, utilizando, para isso, a energia que pode ser diretamente obtida das condições locais.

A arquitetura bioclimática não se restringe a características arquitetônicas adequadas. Preocupa-se, também, com o desenvolvimento de equipamentos e sistemas que são



necessários ao uso da edificação (aquecimento de água, circulação de ar e de água, iluminação, conservação de alimentos, etc.) e com o uso de materiais de conteúdo energético tão baixo quanto possível.

1.3. 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 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.

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.



2. 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 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 em dispositivos conhecidos como *células fotovoltaicas*. Estas células são componentes optoeletrônicos que convertem diretamente a radiação solar em eletricidade. São basicamente constituídas de materiais semicondutores, sendo o silício o material mais empregado.

2.1. 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.

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

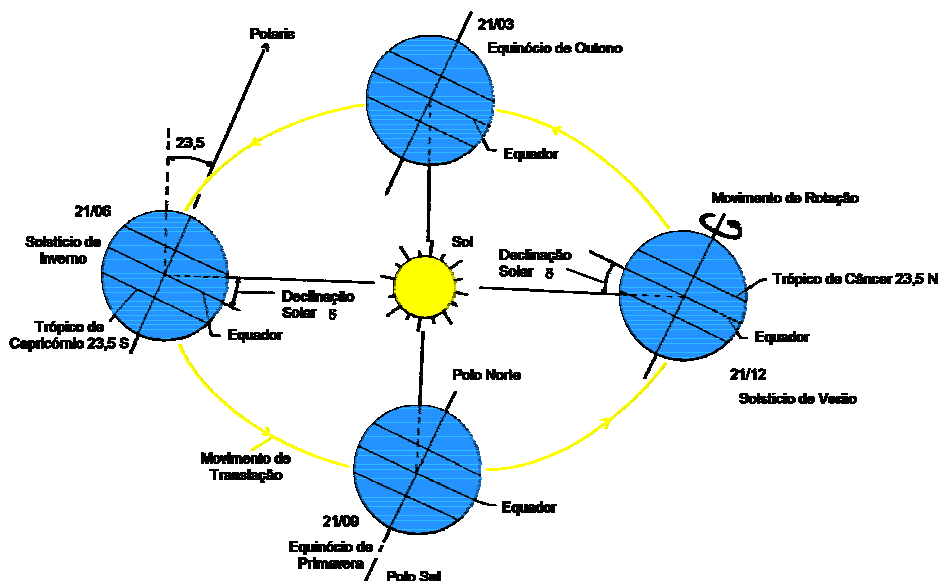


Figura 2.1 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de $23,5^{\circ}$.

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. 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 $0,1 \mu\text{m}$ 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.

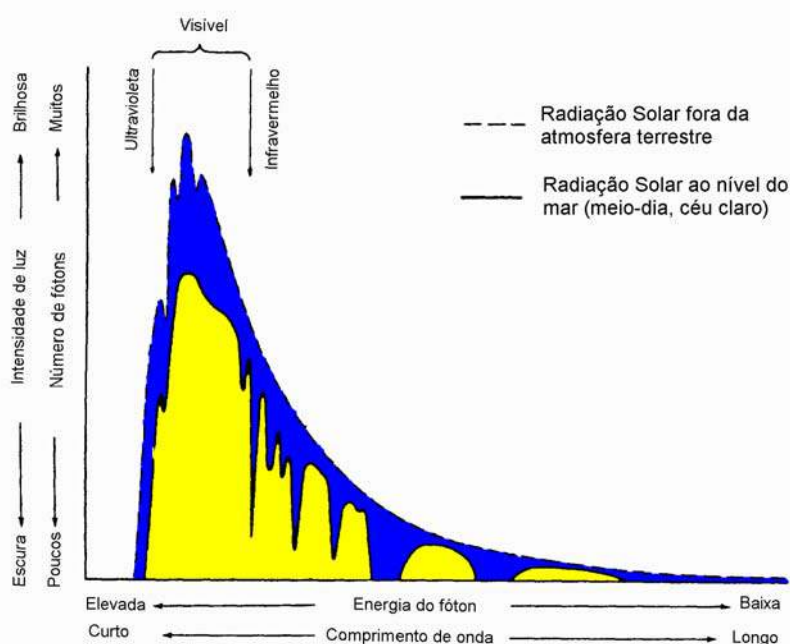


Figura 2.2 - Distribuição espectral da radiação solar.

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.

2.2. Radiação Solar a 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 um componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa.

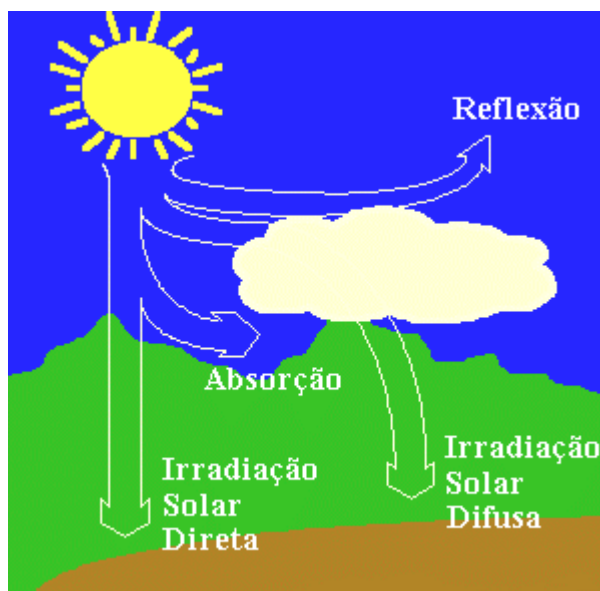


Figura 2.3 - Componentes da radiação solar ao nível do solo

Notadamente, se a superfície receptora estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma 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 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.

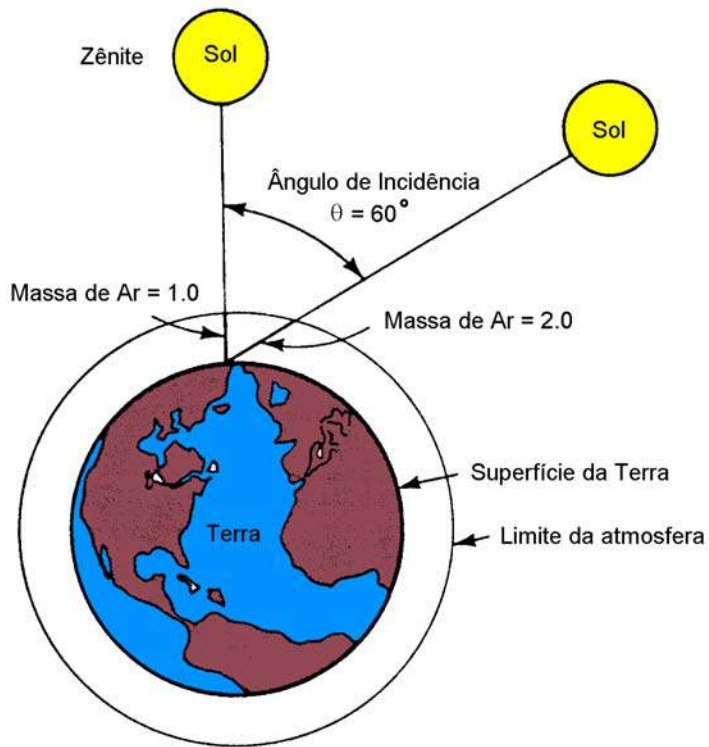


Figura 2.4 - Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM).

3. Solarimetria e Instrumentos de Medição

A medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre é de maior importância para o estudos 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 mostramos alguns instrumentos de medida da radiação, o uso mais freqüente e a classe associada ao seu desempenho.

3.1. 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 iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca um diferencial 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. Estes piranômetro é largamente utilizados pois apresentam 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). Existem vários modelos de diversos fabricantes entre eles podemos citar: Eppley 8-48 (USA), Cimel CE-180 (França), Schenk (Áustria), M-80M (Russia), Zonen CM5 e CM10 (Holanda).

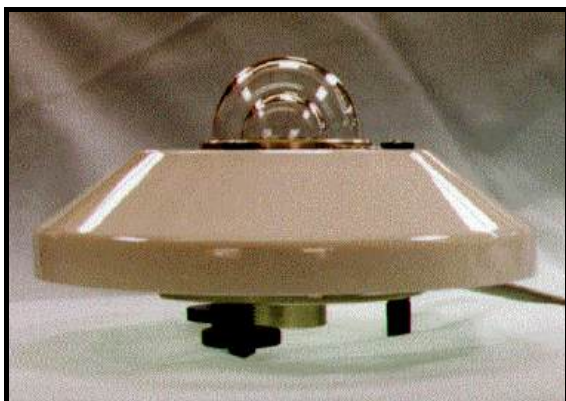


Figura 3.1 - Piranômetro de Segunda Classe

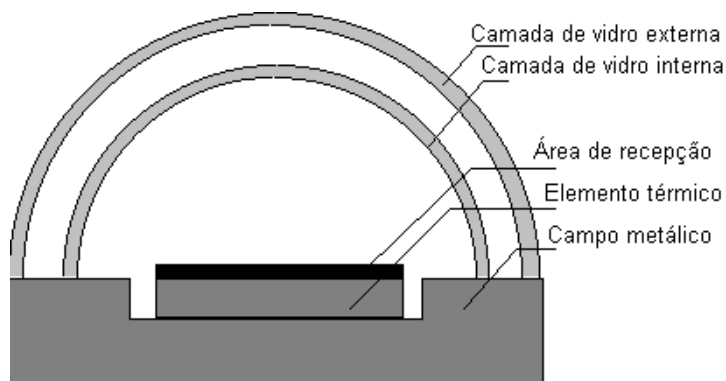


Figura 3.2 - Secção transversal de um piranômetro

3.2. Pireliômetros

Os pireliômetros são instrumentos que medem 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 3.3 - Pireliômetros de Cavity Absoluta



Figura 3.4 - Pireliômetros de Incidência Normal

3.3. Heliógrafo

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 energrecida. O cumprimento desta fita exposta a radiação solar mede o número de horas de insolação.



Figura 3.5 - Heliógrafo Capbell-Stokes

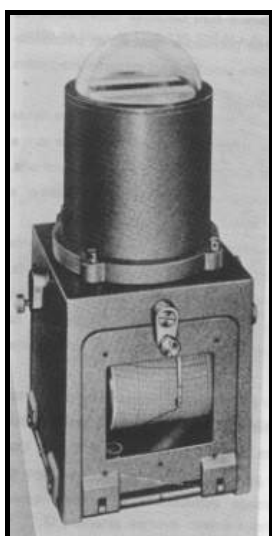


Figura 3.6 - Actinógrafo Robitzsch-Fuess

3.4. Actinógrafo

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 que, quando de suas expansão, 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.

4. Energia Solar Fotovoltaica

A conversão de energia solar em energia elétrica foi verificado 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 aprimorou-se 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 a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais mas que fosse intensamente estudados e utilizados 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 sistemas 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.

4.1. Efeito fotovoltaico

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

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



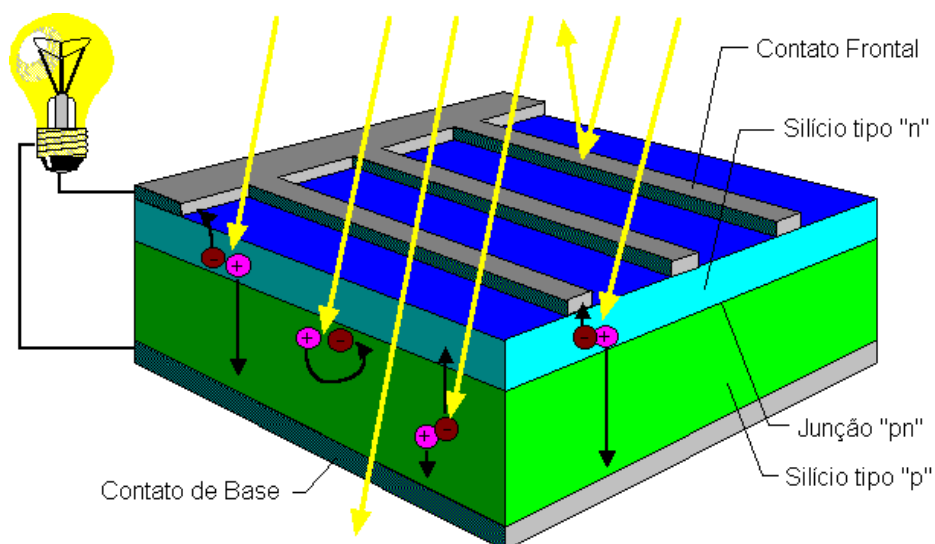


Figura 4.1 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica

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

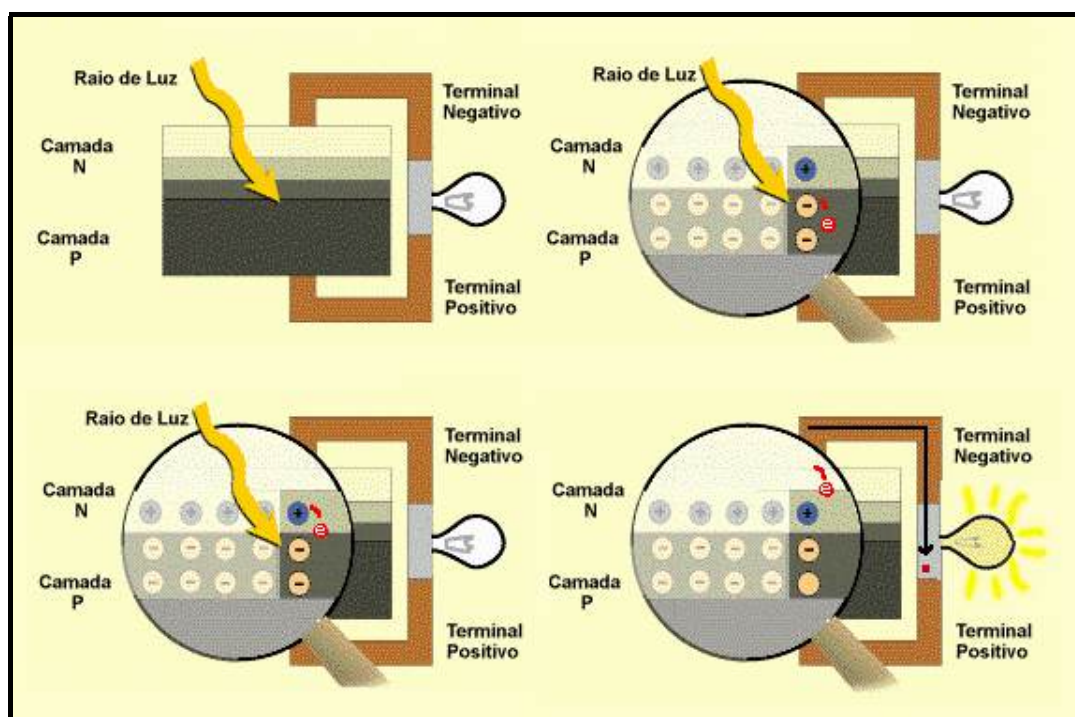


Figura 4.2 - Efeito fotovoltaico na junção pn

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 a base do funcionamento das células fotovoltaicas.

4.2. Tipos de Células

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

4.2.1. Silício Monocristalino

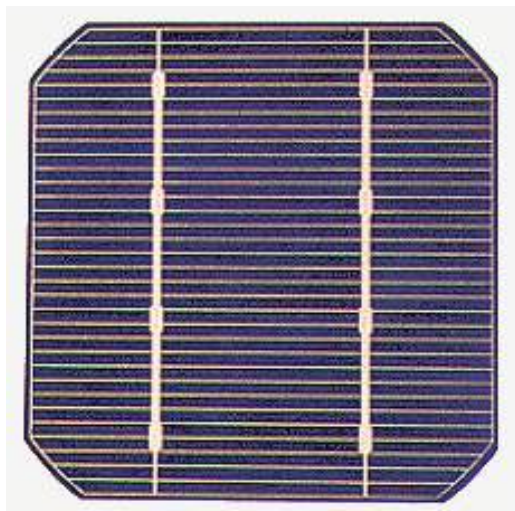


Figura 4.3 - Célula de silício monocristalino

A célula de silício monocristalino é historicamente as mais usadas 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 custo. Este silício para funcionar como células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,9999%.

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 orientada 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 μ m.

Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, deve-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de



silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000°C.

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

4.2.2. Silício Policristalino

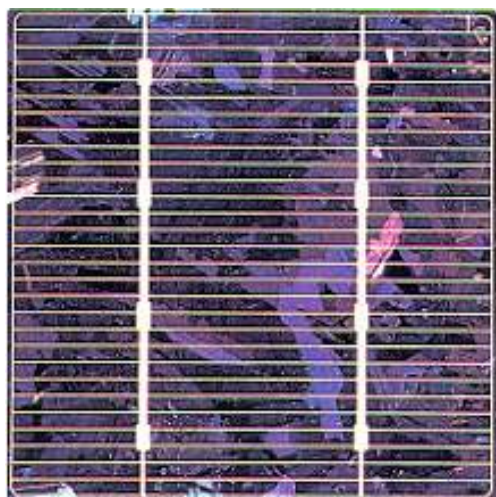


Figura 4.4 - Célula de silício policristalino

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 utilizada 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.

4.2.3. 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; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil.

Por outro lado, o silício amorfo apresenta vantagens que compensam as deficiências acima citados, são elas:

- processo de fabricação relativamente simples e barato;
- possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;

- baixo consumo de energia na produção.



5. Módulos Fotovoltaicos

Pela baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos 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.

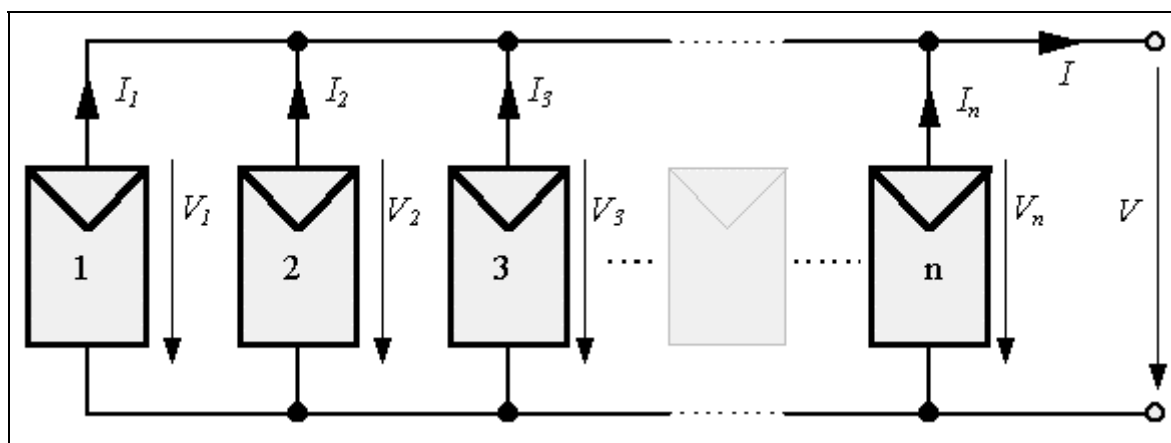


Figura 5.1 - Conexão de células em paralelo

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 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.

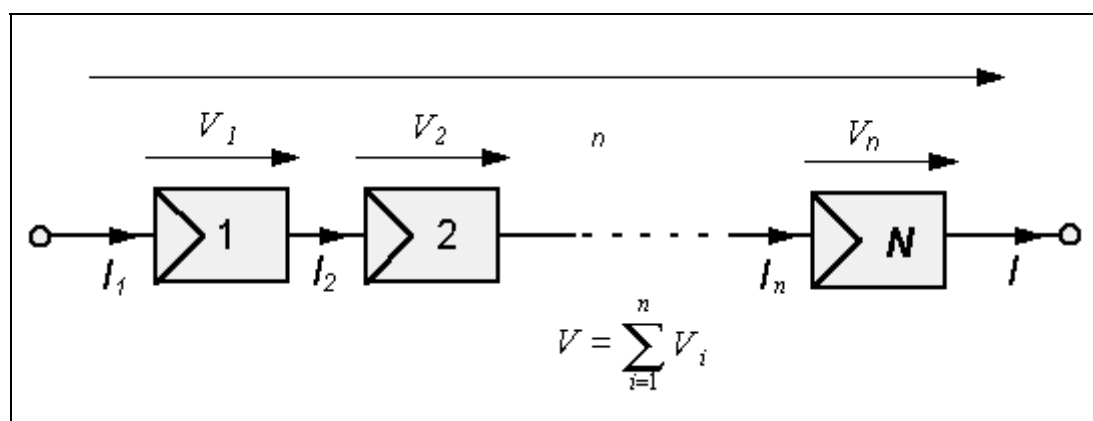


Figura 5.2 - Arranjo das células em série

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitado 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 muito mais barato comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula.

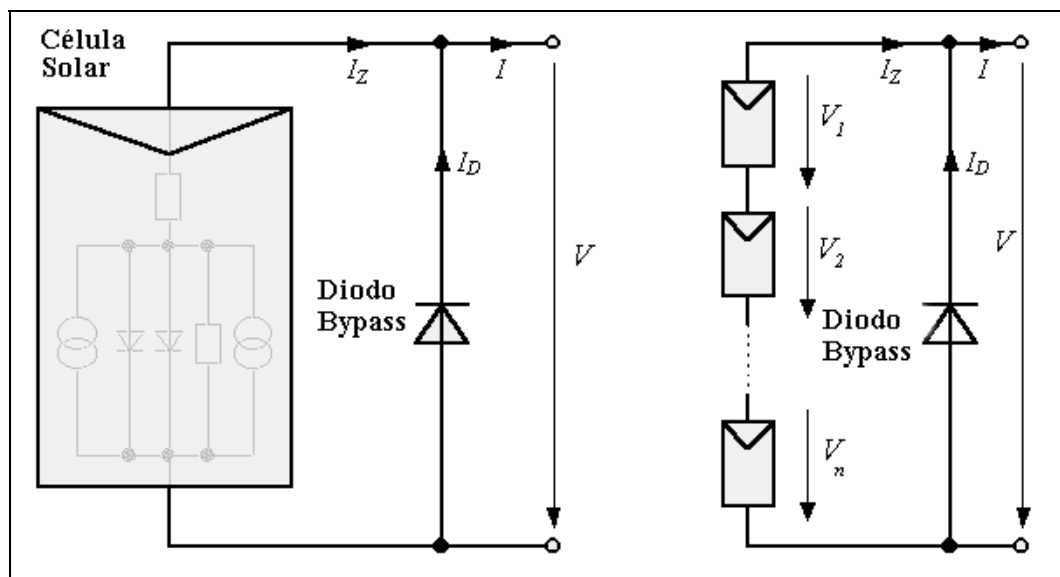
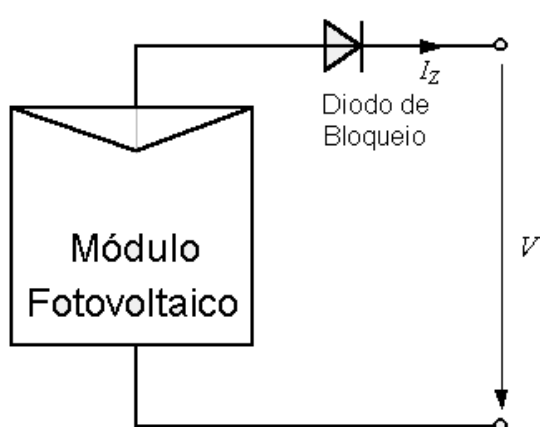


Figura 5.3 - Possível ligação para um diodo bypass entre células



Um 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 esses problemas, usa-se um diodo de bloqueio impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria.

Figura 5.4 - Diodo de bloqueio

5.1. Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico. Tão necessário quanto este parâmetro, existe outras características elétricas que melhor caracterizam a funcionalidade 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).

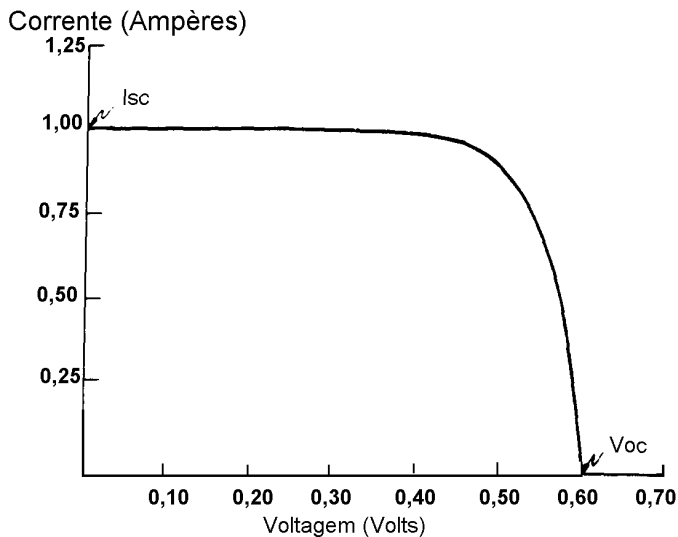


Figura 5.5 - Curva característica $I \times V$ mostrando a corrente I_{sc} e a tensão V_{oc}

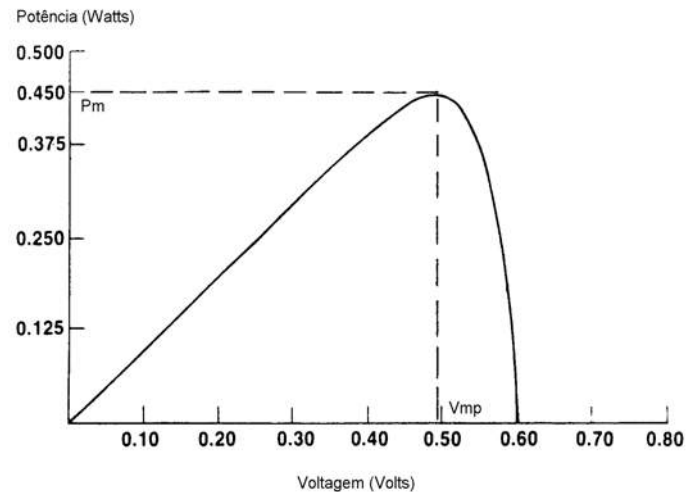


Figura 5.6 - Curva típica de potência versus tensão

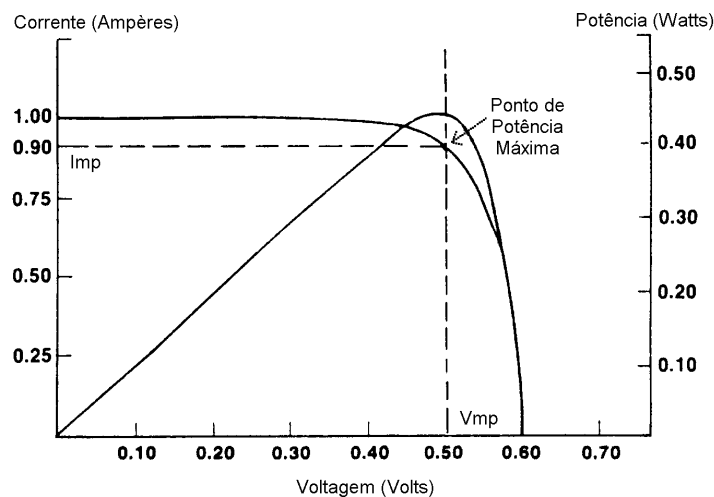


Figura 5.7 - Parâmetros de potência máxima

5.2. Fatores que afetam as características elétricas dos módulos

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um painel é 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.

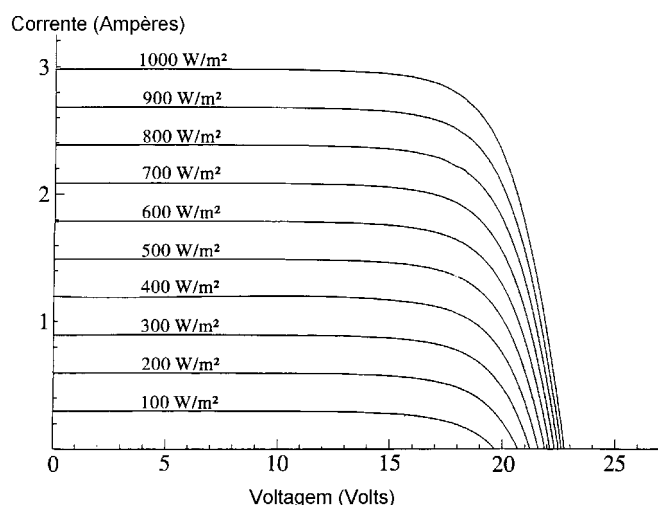


Figura 5.8 - Efeito causado pela variação de intensidade luminosa.

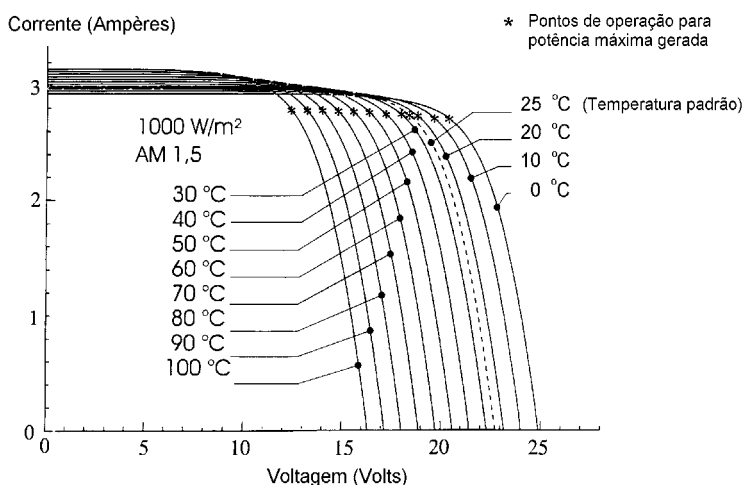


Figura 5.9 - Efeito causado pela temperatura na célula.

5.3. Alguns modelos de módulos fotovoltaicos

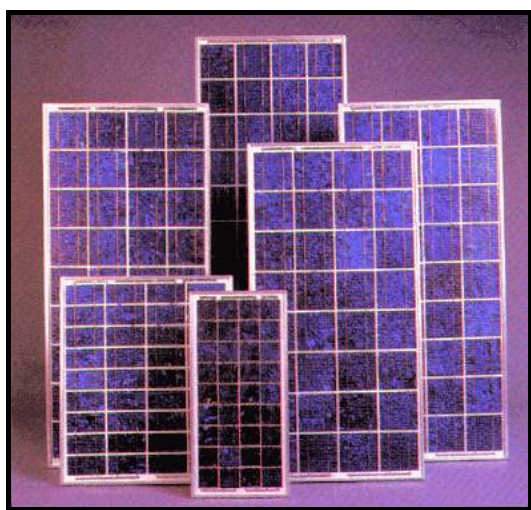


Figura 5.10 – Módulo fabricado pela empresa Kyosera.



Figura 5.11 – 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.

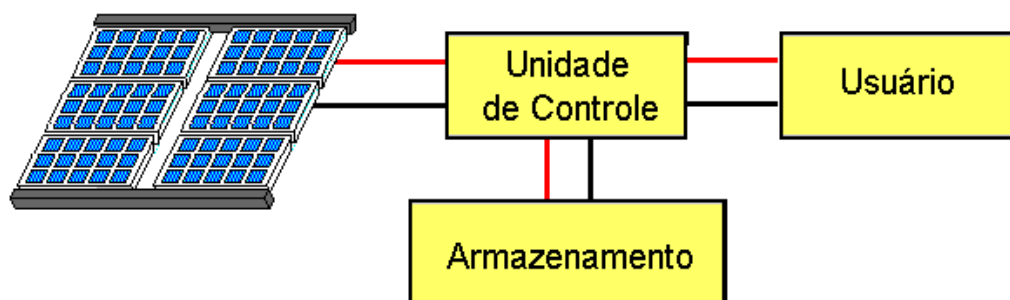


Figura 6.1 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico.

6.1. Sistemas Isolados

Sistemas isolados, em geral, utiliza-se 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 estocadas 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.

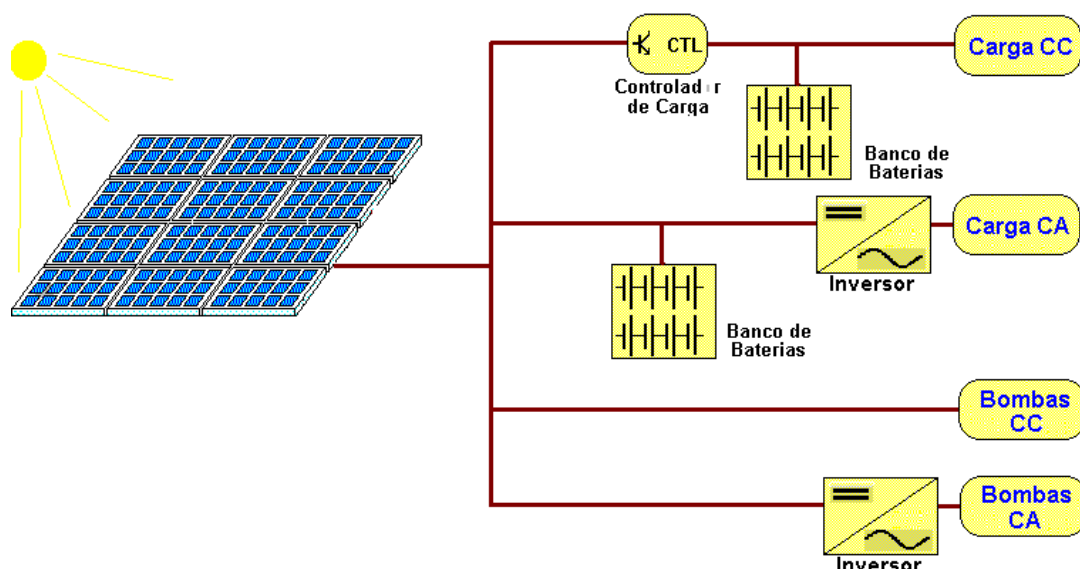


Figura 6.2 - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada.

6.2. Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são aqueles que, desconectado da rede convencional, apresenta 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 torna-se complexo na necessidade de otimização do uso das energias. É necessário um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário.

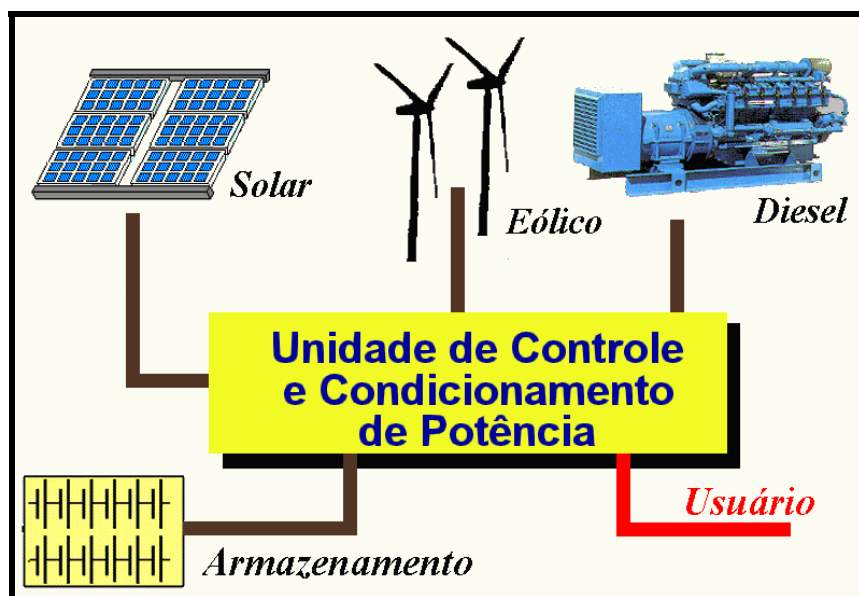


Figura 6.3 - Exemplo de sistema híbrido.

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. Devido a grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular para cada caso.

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 em inversores e logo em seguida guiados diretamente na rede. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada.

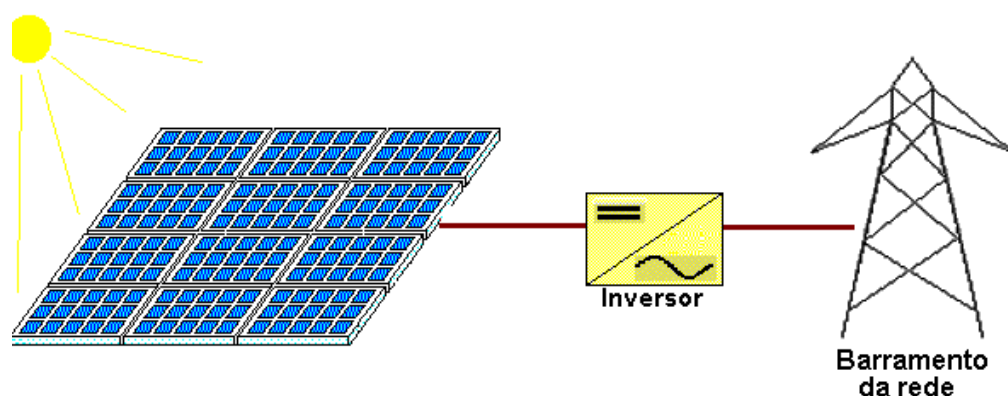


Figura 6.4 - Sistema conectado à rede.

7. Sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil

No Brasil existem hoje vários projetos em nível governamental e privado. Esses projetos englobam diversos aspectos da utilização da energia solar como na eletrificação rural, no bombeamento d'água e também em sistemas híbridos. Aqui serão apresentados alguns dos sistemas instalados no Brasil mostrando suas características e as populações beneficiadas.

7.1. Sistema de Bombeamento Fotovoltaico para Irrigação



Figura 7.1 - Bóia flutuante em Valente- BA.

No município de Capim Grosso, o sistema de bombeamento fotovoltaico foi instalado no açude Rio dos Peixes e é formado por 16 painéis M55 da Siemens e uma bomba centrífuga de superfície Mc Donald de 1HP DC. Devido às variações sazonais do nível da água no açude, a solução mais prática foi a instalação do sistema em uma balsa flutuante ancorada.

O sistema completo fica a 15m. da margem do açude, quando em época de cheia, e bombeia a uma distância de 350m com vazão de 12 m³ por dia. O sistema foi implantado no âmbito da cooperação NREL/CEPEL/

COELBA, tendo participado ainda a Coordenação de Irrigação da Secretaria de Agricultura e Irrigação do Estado da Bahia e a Associação de Moradores de Rio do Peixe. Dez sistemas similares estão em fase de instalação no mesmo açude.

7.2. Sistema de Eletrificação Residencial no Ceará

Este projeto de eletrificação fotovoltaica faz parte da primeira fase do acordo NREL/CEPEL/COELCE, e é parte integrante do Programa LUZ DO SOL. O sistema foi instalado em várias localidades do interior do Ceará. Foram também implantados sistemas de iluminação pública em cada localidade onde foram instalados sistemas residenciais e escolares.



Figura 7.2 - Sistemas fotovoltaicos em casas geminadas no município de Pentecoste – CE.

O primeiro sistema, dentro da primeira fase do acordo NREL/CEPEL/COELCE, foi instalado em dezembro de 1992 no município de Cardeiro e vem operando nestes últimos anos, de forma contínua.

Este projeto atende a 14 vilas do interior do Ceará beneficiando um total de 492 residências num total de 30,74 kWp de potência solar instalados. A tabela mostra as localidades beneficiadas com os sistemas de eletrificação fotovoltaica e a sua aplicação.

LOCALIDADE		NÚMERO DE SISTEMAS RESIDÊNCIAIS
VILA	MUNICÍPIO	
Baixio Grande	Alto Santo	55
Alto Grande	Apuiarés	12
Lagoa das Pedras	Apuiarés	42
Bonitinho	Canindé	73
São Serafim	Canindé	65
Riacho das Pedras	General Sampaio	7
Cajazeiras	General Sampaio	10
São Tomé	Itapipoca	35
Lagoa da Cruz	Itapipoca	62
Bastiões	Itapipoca	33
Irapuá	Pentecoste	26
Cacimbas	Pentecoste	11
Lagoa do Feijão	Quixadá	32
Cordeiros	São Gonçalo do Amarante	29
TOTAL		492

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

- 1 Módulo da Siemens M55 (53Wp)
- 1 Bateria Delco 2000 (105Ah/12V)
- 20W em lâmpadas fluorescentes
- Saída de 12V para alimentação de rádio, toca fitas etc.
- Caixa para proteção da bateria e do controlador de carga

7.3. Sistema Híbrido (Solar- Eólico-Diesel)



Figura 7.3 - Montagem do sistema híbrido de Joanes.

Este sistema foi instalado na comunidade de Joanes no Pará é o primeiro Sistema Híbrido Solar- Eólico-Diesel a ser implantado no Brasil e conta com equipamentos doados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), o acompanhamento técnico do Laboratório Americano de Energias Renováveis (NREL) e o CEPEL. Em contrapartida, os equipamentos complementares e a mão de obra para instalação, manutenção e acompanhamento de operação ficam a cargo da Companhia Elétrica do Pará - CELPA.

Foram feitas medições de velocidade do vento e de irradiação solar na região e, no período de maio

de 1994 até abril de 1995, foi registrada a média anual de velocidade do vento em 6,6m/s e a média diária de radiação solar de 5,3kWh/m².

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

COMPONENTES	CAPACIDADE	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
Geração Fotovoltaica	10.2kWp	Módulos de Silício Mono.Siemens S.A. M55 - 53Wp
Geração Eólica	40kW	4 Turbinas EólicasBergey Wind Power
Banco de Baterias	400kWh	Baterias Seladas Reguladas à Válvula 2V/1000Ah
Controle e Monitoração	-----	Controladores Lógicos Programáveis a Computador - "WONDERWARE"
Conversor Rotativo	52.5kW	Alternador, motor
Subestação	75kVA	Transformador, Proteção

7.4. Sistema Fotovoltaico em Parques Ecológicos



Em 28 de janeiro de 1995, foi inaugurado o Sistema Gerador Fotovoltaico do Posto Avançado do Parque Ecológico Porto Sauípe - Bahia. Este Sistema é composto de um painel fotovoltaico Solarex de 1,4kWp, fornecendo energia em corrente contínua para um banco de baterias que, através de um inversor alimenta em 110VAC luminárias, equipamentos de informática e sistemas de áudio e vídeo do Posto.

Figura 7.4 - Sistema Fotovoltaico do Parque Ecológico de Porto Sauípe – BA.

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

- 18 módulos Solarex MSX-77 (1386Wp)
- 9 Baterias Delco de 150Ah
- 1 Inversor de 1500W

7.5. Sistema de Telefonia Pública utilizando Energia Fotovoltaica em Maceió-AL



Figura 7.5 - Sistema de cabine telefônica financiado pela TELASA - TELECOMUNICAÇÕES DE ALAGOAS S.A.

8. Bibliografia

Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica (CRESESB/CEPEL) - “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”

Naum Fraidenraich, Francisco Lyra - “Energia Solar - Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotérmoelétrica e Fotovoltaica”

Grupo FAE / DEN (UFPE), “I Curso sobre Eletrificação Rural com Tecnologia Fotovoltaica”, Parte 1, 1992

Siemens Solar Industries - Training Department, “Photovoltaic Technology and System Design - Training Manual”, 1990, Edition 4.0

Relatórios Internos CEPEL/ SGC – “Programa LUZ DO SOL”

THE EPPLEY LABORATORY, INC - <http://www.eppleylab.com/>

INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ENERGIETECHNIK - <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/>

SIEMENS SOLAR INDUSTRIES - <http://www.siemenssolar.com/>

KYOCERA SOLAR INDUSTRIES - <http://www.kyocera.de/>

