

# Energia Solar Fotovoltaica : Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica

**PEA –2420**  
**PRODUÇÃO DE ENERGIA**

**Profa Eliane Aparecida Faria Amaral Fadigas**

**GEPEA – Grupo de Energia**  
**Escola Politécnica**  
**Universidade de São Paulo**



## 1- INTRODUÇÃO

A energia solar pode ser convertida diretamente em eletricidade utilizando-se das tecnologias de células fotovoltaicas. É vista como uma tecnologia do futuro, visto que se utiliza uma fonte limpa e inesgotável que é o Sol.

No atual estado da arte desta tecnologia, ela só encontra viabilidade econômica em aplicações de pequeno porte em sistemas rurais isolados (Iluminação, bombeamento de água etc), serviços profissionais (retransmissores de sinais, aplicações marítimas) e produtos de consumo (relógio, calculadoras).

Porém, sabe-se que o mercado fotovoltaico é ainda uma fração do que poderia ser, visto que existe uma parcela significativa da população mundial, cerca de 1 bilhão de habitantes ou aproximadamente 20% da população mundial, localizadas principalmente nas áreas rurais, que não têm acesso a eletricidade .

Pesquisas feitas nos últimos 10 anos, resultando em aumento da eficiência dos módulos e diminuição considerável nos custos de produção, sinalizam boas perspectivas futuras, inclusive para aplicações de maior porte. Este futuro depende também do aumento das pressões mundiais para a utilização de fontes energéticas renováveis e limpas e a continuidade da linha de pensamento governamental dos países industrializados que buscam uma diversificação das fontes de suprimento energético.

Este trabalho, dividido em duas partes, procura apresentar informações básicas relacionadas ao fundamento da energia solar fotovoltaica incluindo, princípio de funcionamento, determinação do recurso solar, estado da arte da tecnologia, principais aplicações, projeto, custos, impactos ambientais, bem como um panorama geral da utilização dos módulos fotovoltaicos no mundo.

## 2- HISTÓRICO

O conhecimento do efeito fotovoltaico remonta ao século XIX, quando em 1839 Becquerel demonstrou a possibilidade de conversão da radiação luminosa em energia elétrica mediante a incidência de luz em um eletrodo mergulhado em uma solução de eletrólito. Esse mesmo efeito é observado num sólido, o selênio, em 1877 por Adams e Day na Inglaterra. Em 1883 aparece a primeira célula solar produzida com selênio, com eficiência de conversão de aproximadamente 1%.

Já neste século, na década de 30, os trabalhos de diversos pioneiros da física do estado sólido, como Lange, Grondahl e Schottkl, apresentaram importantes contribuições para se obter uma clara compreensão do efeito fotovoltaico em junção do estado sólido. Em 1941, Ohl obtém a primeira fotocélula de silício monocristalino. No ano de 1949, Billing e Plessnar medem a eficiência de fotocélulas de silício cristalino, ao mesmo tempo em que a teoria da junção P-N de Shockely é divulgada. É, porém, apenas em 1954 que surge a fotocélula de silício com as características semelhantes às encontradas hoje com eficiência de 6%.

O ano de 1958 marca o início, com grande sucesso, da utilização de fotocélulas nos programas espaciais, sendo este o principal uso das células solares até o final da década de 70.

Grande impulso foi dado à utilização terrestre da geração fotovoltaica a partir da crise mundial de energia em 1973/1974. A partir do fim da década de 70, o uso terrestre supera o uso espacial, sendo que esta diferença tem aumentado grandemente.

Este uso crescente vem sendo acompanhado por inovações que permitem o aumento da eficiência de conversão de energia das fotocélulas, bem como uma significativa redução de seus custos.

O problema da eficiência de conversão e custo de material, e ainda o grande conhecimento adquirido pela teoria física das células têm impulsionado a pesquisa de células solares produzidas com materiais diferentes do silício monocristalino. Atualmente são estudados e mesmo utilizados o silício policristalino e amorfo, o arseneto de gálio e o sulfeto de cádmio, dentre outros. No entanto, o conhecimento da tecnologia que emprega o silício, em particular o monocristal e a abundância da matéria prima que lhe dá origem, tem sido as razões mais importantes que tornaram o silício o material predominante no processo de desenvolvimento tecnológico.

### **3- O RECURSO SOLAR**

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre,  $5,445 \times 10^{24}$  joules ou  $1,5125 \times 10^{18}$  kWh de energia. Trata-se de um valor considerável comparado, por exemplo, com o total de energia produzido em 1970 por todos os sistemas desenvolvidos pelo homem, que foi igual a  $2 \times 10^{20}$  joules ou 0,004% da energia recebida do Sol.

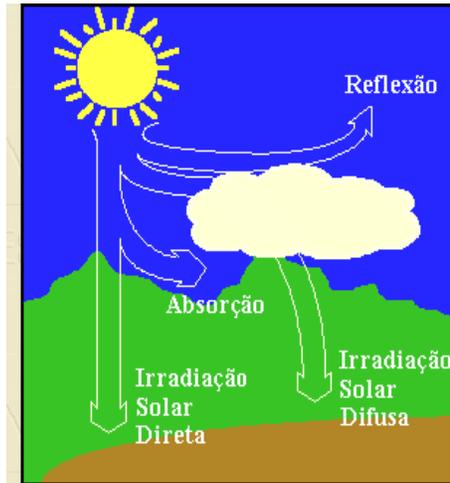
Ao longo do século, uma atenção crescente está sendo dada ao estudo das possibilidades de aproveitamento desta forma de energia. Isto requer um conhecimento detalhado da mesma, de quanta energia está realmente disponível e em que frequência e comprimento de onda.

#### **3.1 Características fundamentais**

A transmissão da energia do Sol para a Terra se dá através da radiação eletromagnética, sendo que 97% da radiação solar está contida entre comprimentos de onda de 0,3 a 3,0  $\mu$ m, o que caracteriza como uma radiação de ondas curtas.

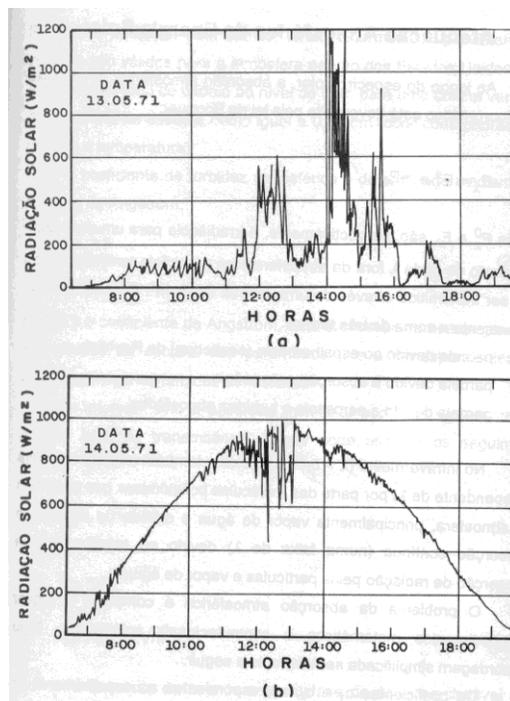
Para a análise da radiação na superfície terrestre é importante o conhecimento da intensidade da radiação e de sua composição. A radiação solar incidente no limite superior da atmosfera sofre uma série de reflexões, dispersões e absorções durante o seu percurso até o solo devido as flutuações climáticas.

A incidência total da radiação solar sobre um corpo localizado no solo é a soma das componentes direta, difusa e refletida (figura 1). Radiação direta é a radiação proveniente diretamente do disco solar e que não sofreu nenhuma mudança de direção além da provocada pela refração atmosférica. Radiação difusa é aquela recebida por um corpo após a direção dos raios solares ter sido modificada por reflexão ou espalhamento na atmosfera. A radiação refletida depende das características do solo e da inclinação do equipamento captador.



**Figura 1 – Forma de incidência da radiação solar na superfície**

Os níveis de radiação solar em um plano horizontal na superfície da Terra variam com as estações do ano, devido principalmente à inclinação do seu eixo de rotação em relação ao plano da órbita em torno do Sol. Variam também com a região, devido principalmente às diferenças de latitude, condições meteorológicas e altitudes. A figura 2 mostra o perfil da radiação solar incidente num mesmo local em dias consecutivos.



**Figura 2 – Perfil de incidência da radiação solar num determinado local**

### 3.2 Instrumentos de medição da radiação solar

Os instrumentos solarimétricos medem a potência incidente por unidade de superfície, integrada sobre os diversos comprimentos de onda. A radiação solar cobre toda a região do espectro visível, 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ , uma parte do ultravioleta próximo de 0,3 a 0,4  $\mu\text{m}$ , e o infravermelho no intervalo de 0,7 a 5  $\mu\text{m}$ . As medições padrões são a radiação total e componente difusa no plano horizontal e a radiação direta normal. Existem vários instrumentos de medição da radiação solar podendo-se destacar:

**Heliógrafo** – Este instrumento tem por objetivo medir a duração da insolação, ou seja, o período de tempo em que a radiação solar supera um dado valor de referência. O heliógrafo opera a partir da focalização da radiação solar sobre uma carta que, como resultado da exposição, é enegrecida. O comprimento desta região mede o chamado número de horas de brilho de Sol.

**Piranômetros** – São instrumentos que medem a radiação total, ou seja, a radiação que vem de todas as direções no hemisfério. Destacam-se os piranômetros fotovoltaicos e termoeletrônicos.

**Piroheliômetros** – É um instrumento utilizado para medir a radiação direta. Ele se caracteriza por possuir uma pequena abertura de forma a “ver” apenas o disco solar e a região vizinha, denominada circumsolar.

**Actinógrafos** – São utilizados para medição da radiação total ou sua componente difusa, possuindo o sensor e registrador na mesma unidade. Consiste essencialmente em um receptor com três tiras metálicas, a central de cor preta e as laterais brancas. As tiras brancas estão fixadas e a preta está livre em uma extremidade, e irão se curvar, quando iluminadas, em consequência dos diferentes coeficientes de dilatação dos metais que as compõem.

Devido a natureza estocástica da radiação solar incidente na superfície terrestre, é conveniente basear as estimativas e previsões do recurso solar em informações solarimétricas levantadas durante prolongados períodos de tempo.

Os dados solarimétricos são apresentados habitualmente na forma de energia coletada ao longo de um dia, sendo este parâmetro uma média mensal ao longo de muitos anos. As unidades de medição mais frequentes são : Langley/dia (ly/dia),  $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{dia}$ ,  $\text{Wh}/\text{m}^2$  ( 1 ly/dia = 11,63  $\text{Wh}/\text{m}^2$  = 0,486  $\text{W}/\text{m}^2$ ).

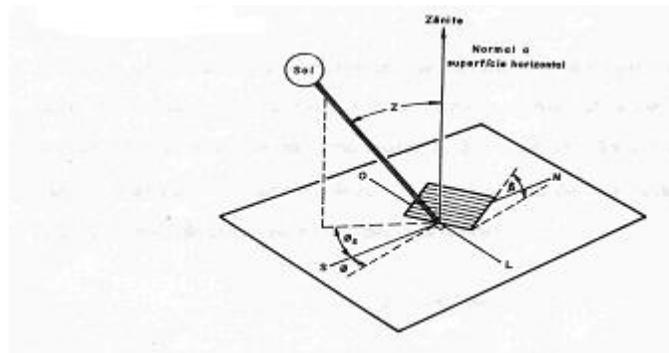
Com as condições atmosféricas ótimas, ou seja, céu aberto sem nuvens, a iluminação máxima observada ao meio-dia num local situado ao nível do mar se eleva a  $1\text{kW}/\text{m}^2$ . Atinge  $1,05\text{kW}/\text{m}^2$  a 1000 metros de altura e  $1,1\text{kW}/\text{m}^2$  nas altas montanhas. A intensidade fora da atmosfera se eleva a  $1,377\text{kW}/\text{m}^2$  e é chamada de **constante solar**. Trata-se de um valor médio, pois varia com a distância da terra em torno do Sol.

Para se ter uma idéia da intensidade da radiação solar total incidente em alguns locais da superfície da Terra, podemos citar como exemplos uma superfície horizontal no sul da Europa Ocidental (Sul da França) que recebe em média por ano uma radiação de  $1500\text{kWh}/\text{m}^2$ , e no norte, a energia varia entre 800 a  $1200\text{kWh}/\text{m}^2$  por ano. Uma superfície no deserto do Saara recebe cerca de  $2600\text{kWh}/\text{m}^2/\text{ano}$ , que dizer, duas vezes a média européia.

O Brasil possui um ótimo índice de radiação solar, principalmente o nordeste brasileiro. Na região do semi-árido temos os melhores índices, com valores típicos de 200 a 250 W/m<sup>2</sup> de potência contínua, o que equivale entre 1752 kWh/m<sup>2</sup> a 2190kWh/m<sup>2</sup> por ano de radiação incidente. Isto coloca o local entre as regiões do mundo com maior potencial de energia solar.

### 3.3 Estimativa da radiação solar

A realização de projetos de sistemas solares exige o conhecimento da energia coletada pelo plano de abertura dos equipamentos, em nosso caso, os painéis fotovoltaicos (figura 3). Habitualmente, as estações solarimétricas fornecem dados de radiação solar global, média mensal, sempre no plano horizontal.



**Figura 3 – Plano de abertura do equipamento**

A partir dos dados fornecidos pelas estações solarimétricas, existem métodos que permitem gerar dados numa escala de tempo qualquer, seja diária, horária ou ainda menor. A utilização de uma escala temporal reduzida permite avaliar o desempenho do equipamento solar em condições mais próximas da realidade, pois leva em conta as variações no comportamento dos componentes estudados com a variação da radiação incidente em períodos de tempo compatíveis com outros modelos: de carga, por exemplo.

Os dados da radiação solar podem ser especificados em termos de fluxo de potência (valores instantâneos – kW) ou energia – kWh (com diversos períodos de integração) por unidade de área. A forma mais comum de apresentação dos dados de radiação é através de valores médios mensais para a energia acumulada ao longo do dia.

Uma forma bastante conveniente de se expressar o valor acumulado de energia solar ao longo de um dia é através do número de horas de Sol Pleno. Esta grandeza reflete o número de horas em que a radiação solar deve permanecer constante e igual a 1kW/m<sup>2</sup> de forma que a energia resultante seja equivalente à energia acumulada para o dia e local em

questão. Mostra-se abaixo, um exemplo de cálculo de número de horas de Sol Pleno (SP) para um caso em que a energia diária acumulada é de 6kWh/m<sup>2</sup>.

$$SP = \frac{6[kWh/m^2]}{1[kW/m^2]} = 6 \text{ [horas/dia]}$$

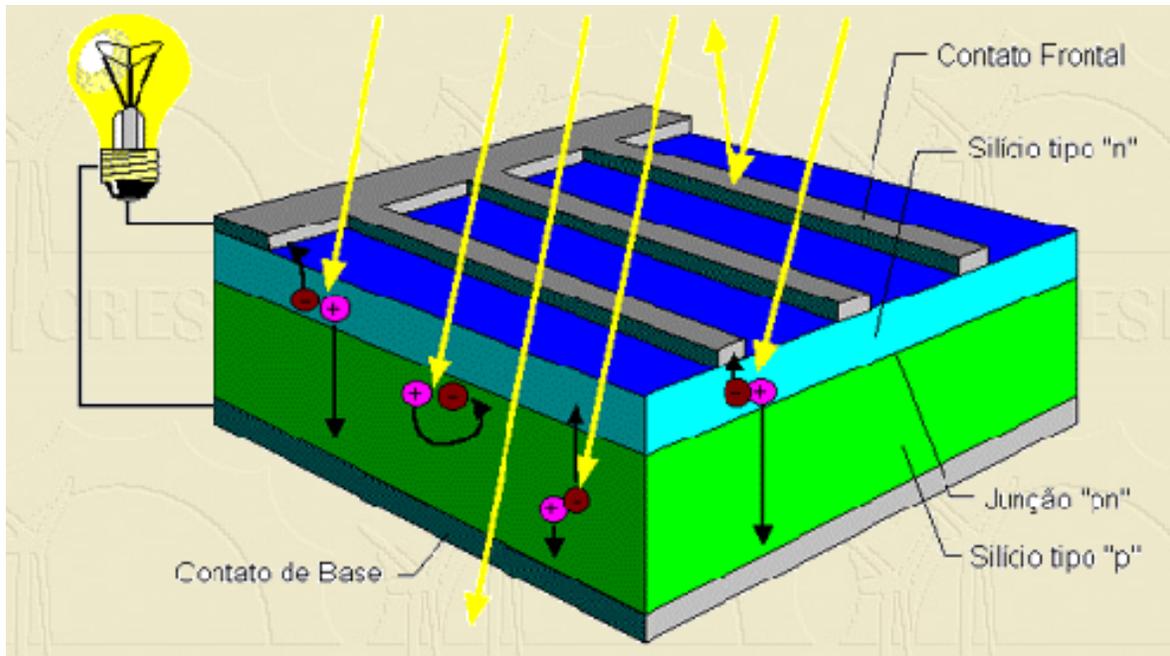
## **4 - SISTEMA DE CONVERSÃO – CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

### **4.1 Princípio de funcionamento**

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico.

Existem na natureza materiais classificados como semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia à temperaturas muito baixas. A figura 4 ilustra a formação de uma célula fotovoltaica.

A separação entre as duas bandas de energia permitida nos semicondutores (gap de energia) é da ordem de 1eV, o que os diferencia dos isolantes onde o gap é de vários eVs. Isto faz com que os semicondutores apresentem várias características interessantes. Uma delas é o aumento de sua condutividade com a temperatura, devido à excitação térmica de portadores da banda de valência para a banda de condução. Uma propriedade fundamental para as células fotovoltaicas é a possibilidade de fótons, na faixa do visível, com energia superior ao gap do material, excitarem elétrons à banda de condução. Este efeito, que pode ser observado em semicondutores puros, também chamados de intrínsecos, não garante por si só o funcionamento de células fotovoltaicas. Para obtê-las é necessário uma estrutura apropriada para que os elétrons excitados possam ser coletados, gerando uma corrente útil.



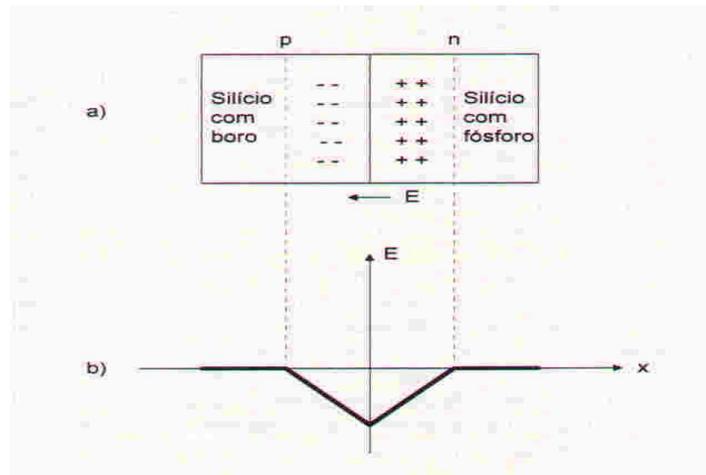
**Figura 4 - Composição de uma célula fotovoltaica**

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

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

À temperatura ambiente, existe energia térmica suficiente para que praticamente todos os elétrons em excesso dos átomos de fósforo estejam livres, bem como que os buracos criados pelos átomos de boro possam se deslocar.

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e átomos de fósforo na outra, será formado o que se chama de *junção pn* (figura 4). O que ocorre nesta junção é que os 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*. A figura 5 mostra a variação do campo elétrico na direção perpendicular à junção *pn*.

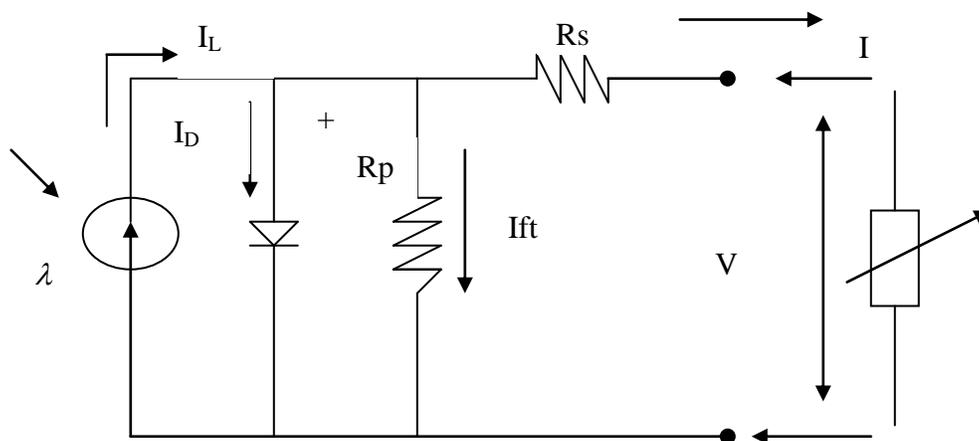


**Figura 5 – (a) junção pn ilustrando região onde ocorre o acúmulo de cargas. b) campo elétrico resultante da transferência de cargas através da junção pn.**

Se uma junção pn, como o da figura acima, 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**.

#### 4.2 Circuito elétrico equivalente e características elétricas

O circuito equivalente que descreve o funcionamento interno de uma célula quando submetida à radiação solar é mostrado na figura 6.



**Figura 6 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica**

Os parâmetros do circuito mostrado na figura 6 são definidos como:

- $I_L$  – corrente gerada pela incidência da radiação
- $I_D, I_o$  – corrente de saturação do diodo
- $I_{ft}$  - corrente de fuga para terra
- $I$  – corrente nos terminais de saída
- $R_p$  – resistência shunt
- $R_s$  – resistência série
- $A$  – parâmetro de correção de curva

Na condição de temperatura e radiação fixa a característica de tensão e corrente desse modelo é dado por:

$$I = I_L - I_D - I_{ft} = I_L - I_o \left\{ \exp \left[ \frac{V + IR_s}{a} \right] - 1 \right\} - \frac{(V + IR_s)}{R_p}$$

A resistência em série representa a resistência interna à passagem da corrente e depende da espessura da junção, das impurezas do material e resistência de contato. Numa célula ideal,  $R_s = 0$  ( nenhuma perda interna) e  $R_p = \infty$  ( nenhuma corrente para terra).

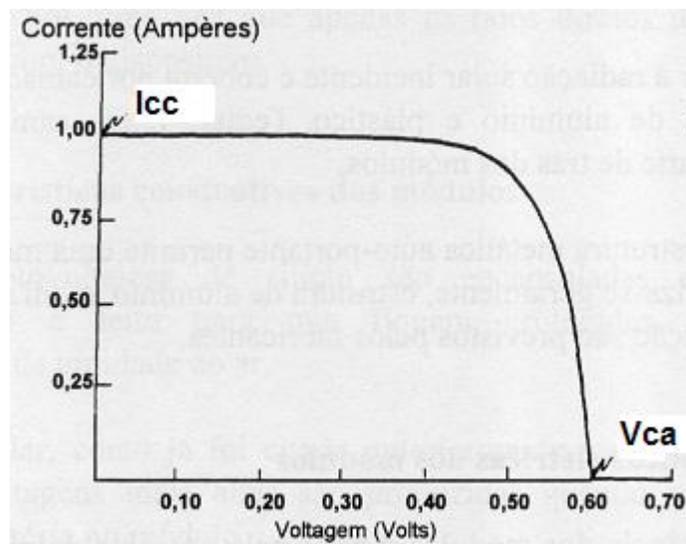
Quando uma célula ou conjunto de células (módulo) está posicionado em direção ao sol, pode-se medir a tensão nos seus terminais. Se nenhuma carga está ligada aos mesmos, ou seja, o circuito está em aberto, nenhuma corrente flui e, portanto a tensão medida é a tensão de circuito aberto.

A tensão de circuito aberto ( $V_{ca}$ ) é definida pela seguinte expressão:

$$V_{ca} = V + I.R_p$$

Um outro parâmetro importante usado para descrever a eficiência de uma célula é a corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ). Esta corrente é medida colocando os terminais da célula em curto-circuito e medindo através de um amperímetro a corrente quando a célula for submetida à radiação completa. Desprezando o pequeno valor das correntes,  $I_D$  e  $I_{ft}$ ,  $I_{cc}$  sob tal condição será igual a  $I_L$ .

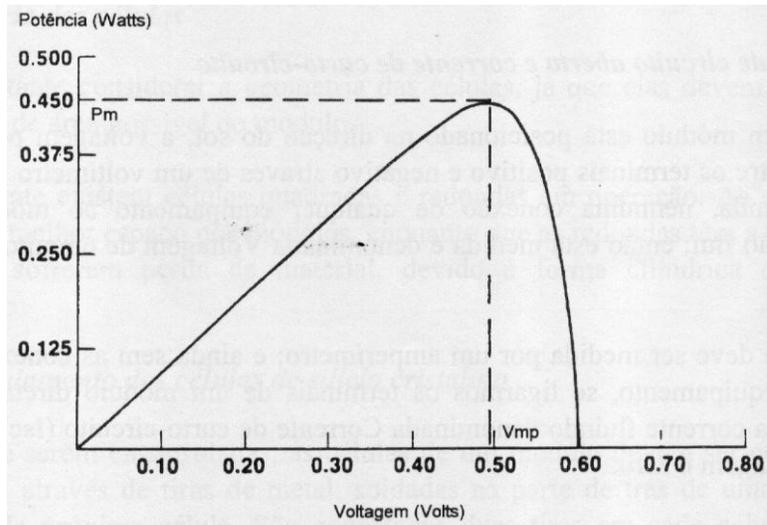
A representação da característica elétrica de uma célula é geralmente representada pela sua curva de corrente versus tensão (I-V). A figura 7 mostra uma curva I-V típica de uma célula. Para cada condição de carga acoplada aos terminais da célula, obtém-se um par de valores I,V. Unindo-se os pontos traça-se a curva I versus V.



**Figura 7 - Curva característica  $I \times V$  típica de uma célula**

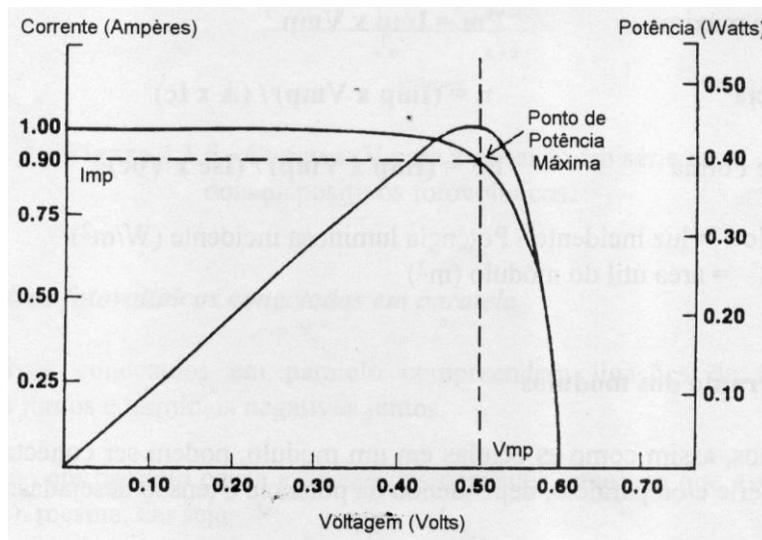
Para esta célula em particular a corrente é aproximadamente constante até o 0,5 volts; a partir desse ponto, a corrente de diodo ( $I_D$ ) torna-se importante. Na condição de circuito aberto em aproximadamente 0,60 volts, toda a corrente de iluminação gerada está passando através do diodo e da resistência em paralelo  $R_p$ . Para comparação, uma célula de silício de  $1 \text{ cm}^2$ , submetida a um nível de radiação solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  tem uma tensão de circuito aberto de aproximadamente 06 volts e uma corrente de curto circuito de aproximadamente 20 a 30 mA.

A potência gerada nos terminais de uma célula é produzida pelo produto da tensão versus corrente em cada ponto da curva. A figura 8 mostra a curva de potência de uma célula em função da tensão nos seus terminais. Note que não há potência gerada quando a tensão e corrente é nula ( $I_{cc}$  e  $V_{ca}$ ). Observando mais ainda esta curva, verificamos que existe um único valor de tensão e correspondente corrente para o qual a potência fornecida na saída da célula ou módulo é máxima. Esta condição corresponde à operação da célula no joelho da curva.



**Figura 8 - Curva típica de potência versus tensão**

A figura 9 mostra a curva de potência superposta a curva característica  $I \times V$ .



**Figura 9 . Curva de potência superposta a curva  $V \times I$ , onde  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  = valor de tensão e corrente respectivamente em que ocorre a potência máxima.**

A tensão nos terminais de uma célula fotovoltaica é muito baixa, aproximadamente 0,6 volts, dependendo do material em que é feita a célula e, conseqüentemente sua corrente também é baixa na ordem  $10^{-3}$  amper. Assim sendo, para se conseguir um valor de potência maior (função da carga a ser alimentada), é necessário que as células sejam ligadas em série e/ou paralelo constituindo o que comumente é chamado de módulo. Existem no mercado módulo de diferentes potências (Ex: 48Wp, 56Wp, entre outros). A figura 10 mostra um esquema de ligação série/paralela de células fotovoltaicas.

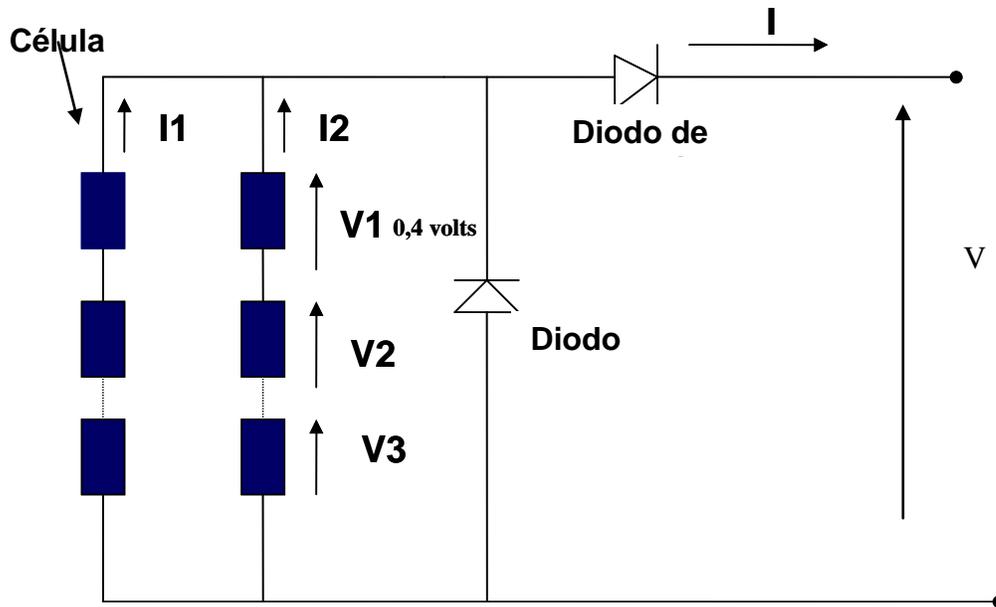


Figura 10 – Células num arranjo série/paralelo formando um módulo

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots V_n$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots I_n$$

A eficiência da fotoconversão de uma célula ou módulo fotovoltaico pode ser definida pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{\text{Potência elétrica fornecida pela célula/ módulo}}{\text{Potência contida na radiação solar incidente}}$$

A eficiência e características elétricas de uma célula dependem de vários parâmetros que serão descritos na seção seguinte.

### 4.3 Parâmetros importantes que influenciam nas características elétricas de um módulo

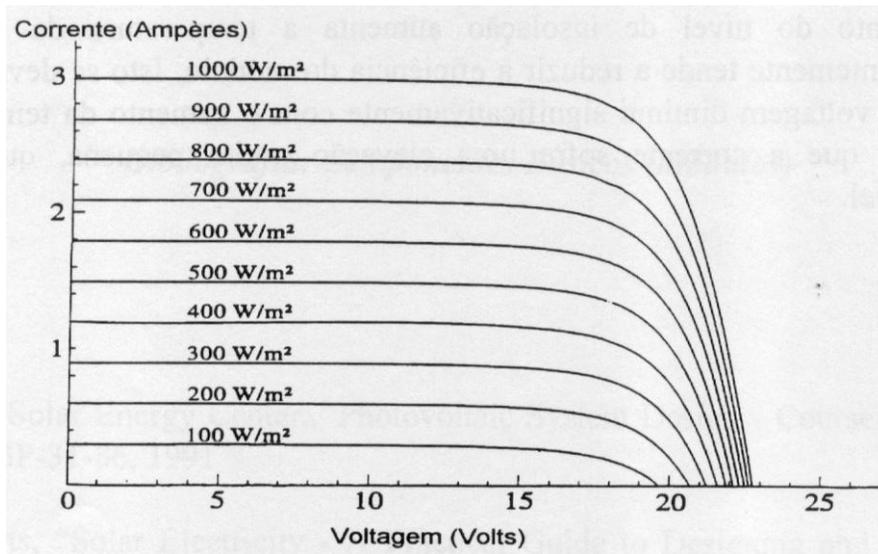
Os principais fatores que influenciam na operação de um módulo fotovoltaico são:

- Intensidade da radiação solar
- A temperatura de operação

#### 4.3.1 Intensidade da radiação solar

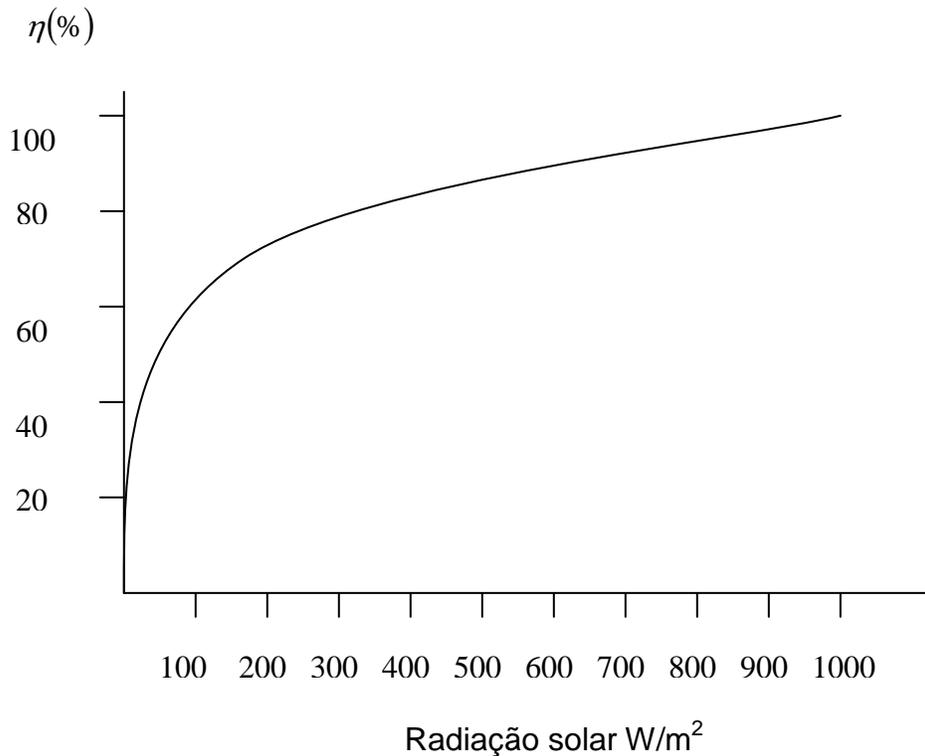
Como apresentado na seção 3, a intensidade da radiação solar muda a cada instante em função da rotação da terra e sua translação ao redor da sol. Ao nível do mar, ao meio dia com céu limpo (sem nenhuma nuvem) a intensidade da radiação solar atinge um valor próximo de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Quando se adquire um módulo fotovoltaico de, por exemplo,  $58 \text{ Wp}$ , significa que este módulo disponibilizará  $58 \text{ Watts}$  quando incidir na superfície da terra  $1000 \text{ W/m}^2$  (sol no zênite – céu limpo). Portanto, a corrente gerada pelo módulo será máxima na incidência de radiação máxima.

Com menores intensidades de radiação solar (dias nublados, por exemplo), a corrente produzida diminuirá na mesma proporção. A redução na tensão de circuito aberto ( $V_{ca}$ ), no entanto é pequena. A figura 11, apresenta a curva característica  $I \times V$  de uma célula ou módulo fotovoltaico para diversas intensidades de radiação solar incidente.



**Figura 11- Curva característica  $I \times V$  para vários níveis de radiação solar**

A eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica varia muito pouca com a radiação solar. A figura 12, por exemplo, mostra que a eficiência da célula em função do nível de radiação solar. Observa-se que para uma ampla faixa de radiação solar a eficiência é praticamente constante.



**Figura 12 – Eficiência de conversão versus radiação**

### 4.3.2 Temperatura de operação

As células fotovoltaicas que compõem um módulo sofrem variações de temperatura em função do nível de radiação solar incidente e temperatura ambiente. Com o aumento da temperatura da célula, a corrente de curto-circuito  $I_{cc}$  aumenta enquanto a tensão de circuito aberto  $V_{ca}$  diminui, o que provoca conseqüentemente provoca uma alteração na potência entregue pelo módulo.

Digamos que  $I_{cc_o}$  e  $V_{ca_o}$  são respectivamente a corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto de uma célula na temperatura de referência  $T$ , e  $\alpha$  e  $\beta$  são os respectivos coeficientes de temperatura. Se, a temperatura de operação é aumentada de um fator  $\Delta T$ ,

Então, a nova corrente e voltagem são dadas pelas expressões:

$$I_{cc} = I_{cc_o}(1 + \alpha.\Delta T) \quad \text{e} \quad V_{ca} = V_{ca_o}(1 - \beta.\Delta T)$$

Visto que a corrente e tensão de operação variam na mesma proporção que  $I_{cc}$  e  $V_{ca}$ , a nova expressão para a potência de saída da célula é:

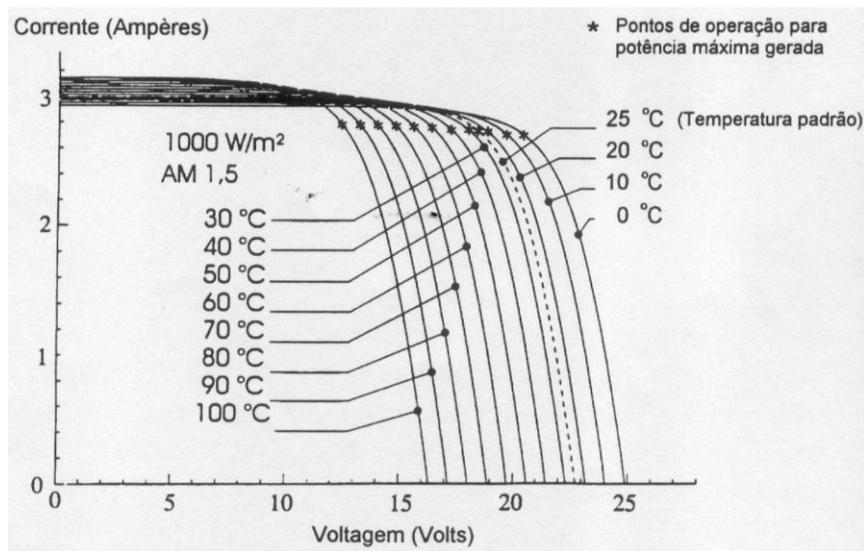
$$P = V.I = I_{cc_o}(1 + \alpha.\Delta T).V_{ca_o}(1 - \beta.\Delta T)$$

Simplificando a expressão acima obtêm-se:

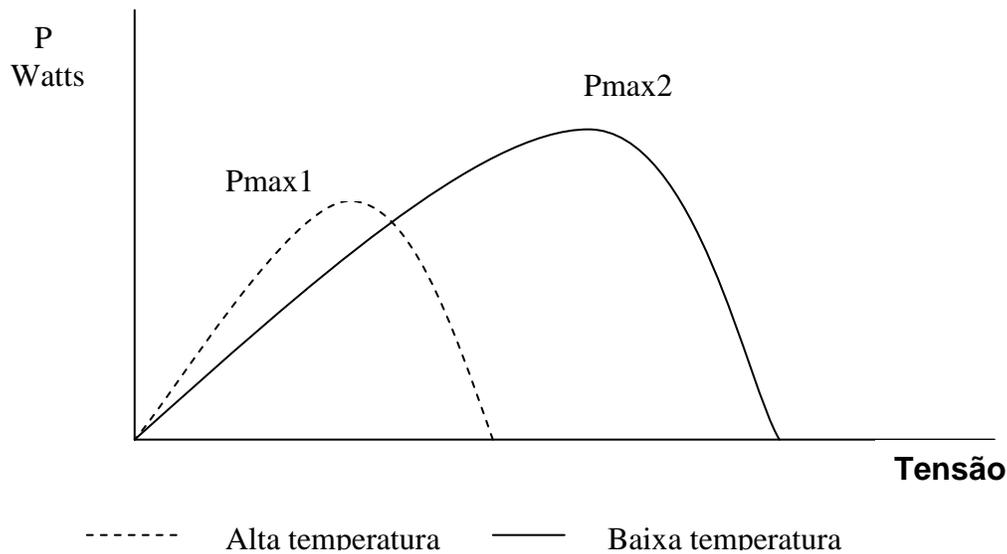
$$P = P_o[1 + (\alpha - \beta)\Delta T]$$

A figura 13 mostra a variação de  $I_{cc}$  e  $V_{ca}$  com a temperatura e a figura 14 mostra o efeito da temperatura na potência de saída de uma célula.

Verifica-se pela figura 13 que a voltagem diminui significativamente com o aumento da temperatura enquanto que a corrente sofre uma elevação pequena. A figura 14 mostra que a máxima potência disponível à uma baixa temperatura é maior do que à uma elevada temperatura. Entretanto, como observado na figura, os dois pontos de máxima potência não ocorrem na mesma tensão. Para capturar o máximo valor de potência em todas as temperaturas, o sistema fotovoltaico é projetado tal que a tensão de saída do módulo  $V_2$  é aumentada para capturar  $P_{max2}$  a uma baixa temperatura e diminuída para  $V_1$  para capturar  $P_{max1}$  na temperatura mais alta. Esta função é realizada por um componente do sistema denominado “seguidor de máxima potência”, que será apresentado mais adiante nesta apostila.



**Figura 13- Efeito causado pela temperatura da célula na curva característica I versus V (para 1000 W/m<sup>2</sup>) em um módulo fotovoltaico.**



**Figura 14- . Efeito da temperatura na curva P versus V. A célula produz mais potência no clima frio**

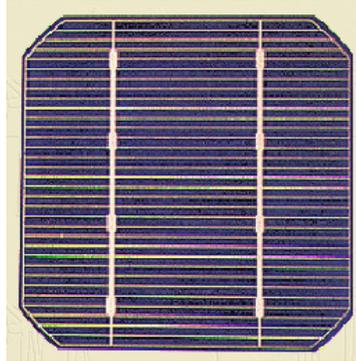
#### 4.4 Materiais de fabricação das fotocélulas

Os semicondutores mais apropriados à conversão da luz solar são os mais sensíveis, ou melhor, aqueles que geram o maior produto corrente-voltagem para a luz visível, já que a maior parcela da energia fornecida pelos raios solares estão dentro da faixa visível do espectro.

Existe todo um processo para que o material semicondutor se transforme realmente em uma célula fotovoltaica. O que ocorre, de uma maneira geral, é que o semicondutor deve passar por uma etapa de purificação e, e, seguida, por um processo de dopagem, através da introdução de impurezas, dosadas na quantidade certa.

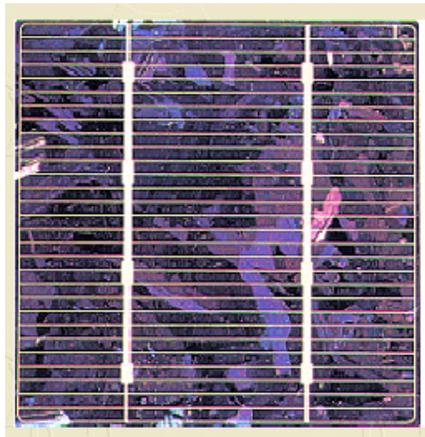
Os principais tipos de células fotovoltaicas são apresentados a seguir:

**Silício (Si) Monocristalino** –É o mesmo material utilizado na fabricação de circuitos integrados para microeletrônica. As células feitas com este material são historicamente as mais utilizadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade. As células são formadas em fatias de um único grande cristal, previamente crescido e enfatiado. A grande experiência na sua fabricação e pureza do material garante alta confiabilidade do produto e altas eficiências. Enquanto o limite teórico de conversão da luz solar em energia elétrica, para esta tecnologia é de 27%, valores nas faixas de 12 a 16% são encontrados em produtos comerciais. Devido às quantidades de material utilizado e à energia envolvida na sua fabricação, esta tecnologia apresenta sérias barreiras para a redução de custos, mesmo em grandes escalas de produção.



**Figura 15 – Célula do tipo monocristalino**

**Silício (si) Policristalino** – Estas células são fabricadas a partir do mesmo material que, ao invés de formarem um único grande cristal, é solidificado em forma de um bloco composto de muitos pequenos cristais. A partir deste bloco são obtidas fatias e fabricadas as células. A presença de interfaces entre os vários cristais reduz um pouco a eficiência destas células. Na prática, os produtos disponíveis alcançam eficiências muito próximas das oferecidas em células monocristalinas.



**Figura 16 – Célula do tipo policristalina**

**Filmes finos** – Pesquisas têm sido feitas no intuito de fabricar células confiáveis, utilizando pouco material semiconductor, obtido de forma passível de produção em larga escala, resultando em um custo mais baixo do produto e conseqüentemente da energia gerada. Estas pesquisas têm se dirigido a diferentes materiais semicondutores e técnicas de deposição destes em camadas finas com espessura de poucos microns. Entre os materiais mais estudados estão o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o disseleneto de cobre e índio (CIS) e o telureto de cádmio (CdTe). O material amorfo difere de um material cristalino pelo fato de não apresentar qualquer ordenamento no arranjo estrutural dos átomos. As células feitas com este material possuem eficiências inferiores

às das células de silício cristalino. A eficiência deste tipo de célula já atingiu 13% em laboratório. Porém, as células comerciais apresentam eficiências em torno de 9%. É a célula mais pesquisada atualmente e a que possui um preço mais baixo devido ao seu processo mais simples de fabricação.

**Arseneto de Gálio (GaAs)** – É um exemplo de semicondutor composto e possui uma estrutura similar à do silício. É muito enfocado como componente em células de multijunção, particularmente visando o uso de concentradores. A sua aplicação está mais limitado à sistemas concentradores e ou espaciais. Células deste tipo operando sem concentração atingem, em laboratório, eficiência de 26% e 28% com concentração. Células comerciais são obtidas com eficiência de 20%.

Dados que mostram a evolução obtida nas eficiências dos diversos tipos de células atualmente utilizadas, demonstram que existe uma crença de que as eficiências dos módulos fotovoltaicos atingirão valores cada vez maiores nos próximos anos. Analisando o comportamento do mercado sob o ponto de vista tecnológico, nota-se que existe uma tendência de que a produção mundial de módulos fotovoltaicos seja dominada pelas tecnologias de silício cristalino e silício amorfo.

## **5. Produção e utilização dos módulos fotovoltaicos**

O Japão é responsável pela maior parte da produção mundial de células de Si amorfo, com quase a totalidade da produção direcionado para o mercado interno de produtos eletrônicos (relógios, calculadoras etc). No entanto, esta situação deve ser alterada, pois os EUA deverão aumentar em 22 MWp/ano a sua produção de silício amorfo. A produção japonesa de módulos de silício cristalino é direcionada ao mercado indiano e para exportações à Europa.

A produção europeia é constituída praticamente em sua totalidade de módulos de Si cristalino convencional. Uma quantidade significativa desses módulos é utilizada na própria Europa em programas financiados pelos governos. Da mesma forma, a produção norte americana constitui-se basicamente na utilização de Si cristalino, embora ainda existam diversos produtores de módulos de silício amorfo voltados para aplicações convencionais.

A ASE Américas produz módulos utilizando a tecnologia “ribbon”, desenvolvida pela Mobil Solar, onde um filme fino de Si já é produzido inicialmente em formato laminar.

A produção de módulos menos convencionais, que utilizam materiais “exóticos” é mínima. A Matsuhita do Japão produz células de CdTe para suas calculadoras e a Entech americana para módulos de concentração.

A tabela 1 apresenta a produção de módulos nas diferentes tecnologias em 2000 .

**Tabela 1 – Produção de módulos em 2000**

**Distribuição pelas diferentes tecnologias  
277,1 MWp / Ano: 2000**

<b>TIPO</b>	<b>PRODUÇÃO (MWp)</b>
<b>Mono- Si</b>	<b>89,8</b>
<b>Poly-Si</b>	<b>129,1</b>
<b>a-Si</b>	<b>26,5</b>
<b>Outros</b>	<b>32,4</b>

As empresas petrolíferas possuem atualmente um fatia considerável do mercado fotovoltaico, sendo representadas por diversas companhias, tais como: BP Solar ( BP, UK); Solarex ( Amoco, EUA); Total Energie ( Total, França); Agip ( Agip, Itália); Mobil Solar (Mobil, EUA); Naps ( Neste, Finlândia). A Exxon teve uma subsidiária fotovoltaica, a Solar Power Corporation, EUA, fechada na década de 80.

A tabela 2 mostra as dez principais indústrias produtoras de módulos fotovoltaicos em 1995.

**Tabela 2 - Produção das dez maiores empresas em 1995**

<b>Empresa</b>	<b>País</b>	<b>Produção/ano ( MWp)</b>
Siemens Solar	EUA	17
Amoco/Eron	EUA	9.50
BP Solar	Europa	7.20
Kyocera	Japão	6.10
Eurosolare	Itália	2.70
Solec Internacional	EUA	2.60
Astropower	EUA	2.50
Photowatt	França	2.05
ASE Américas	EUA	2,00
Hélio	Itália	2.00

Considerando países em desenvolvimento, a Índia é, com larga vantagem, a maior produtora de módulos fotovoltaicos. Sozinha, é responsável por cerca de 5.5% dos 8% da contribuição dos países em desenvolvimento na produção mundial.

No Brasil, existe apenas uma empresa que produz módulos fotovoltaicos, desde o silício grau eletrônico até o produto final. Esta empresa, com capacidade instalada superior a 1,0 MWp em 1992 produziu apenas 0,3 MWp entre Si mono e poli cristalino. Esta empresa encerrou suas atividades em novembro de 1996.

Recentemente, a Siemens instalou no Brasil, em Gravataí RS, na Icotron, uma montadora de módulos fotovoltaicos com células vindo de Camarillo, EUA.

A tabela 3 mostra a evolução total de Wp produzidos mundialmente por cada região desde o ano de 1988 até 1996.

**Tabela 3 - Evolução da produção Mundial de Módulos Fotovoltaicos ( MWp)**

	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
<b>EUA</b>	11.10	14.10	14.80	17.10	18.10	22.44	25.64	34.75	39.85
<b>Japão</b>	12.80	14.20	16.80	19.90	18.80	16.70	16.50	16.40	21.20
<b>Europa</b>	6.70	7.90	10.20	13.40	16.40	16.55	21.70	20.10	18.80
<b>Outros países</b>	3.00	4.00	4.70	5.00	4.60	4.40	5.60	6.35	9.75
<b>total</b>	33.60	40.20	46.50	55.40	57.90	60.10	69.44	77.60	89.60

Fonte: [Maycock, fev 1997]

Algumas considerações a respeito dos mercados:

**Ásia, Pacífico & Japão** – É a região com maior mercado. Em 1993 o consumo estimado nessa região foi de 20 MWp. É difícil avaliar a estrutura do mercado dessa região por ser bastante complexa e por possuir diversos setores distintos. Existe nesse mercado uma grande demanda por silício amorfo, empregado em produtos de consumo. Também existe um significativo mercado para a eletrificação rural, projetos de bombeamento d'água, iluminação e para serviços de saúde básica como tratamento de água e refrigeração de vacinas.

**Europa** – Segundo maior consumidor. Este consumo vem crescendo devido a programas financiados por governos para sistemas conectados à rede, seja nos telhados das casas, seja em centrais fotovoltaicas.

**África** – Na África, o mercado interno se divide em sistemas rurais isolados ( saúde, iluminação residencial, bombeamento de água) e outro, composto por aplicações profissionais remotas ( telecomunicações, sinalização, proteção catódica, entre outras), ambas financiadas por entidades internacionais.

**China/Índia** – Possuem mercados menos expressivos, ambos abastecidos por praticamente em sua totalidade por produtores nacionais. A Índia, exporta uma pequena parcela, utilizada, principalmente em produtos de consumo.

A América do Sul & Caribe, contabilizados na fatia resto do mundo, também possuem participação pouco expressiva do mercado mundial. Em 1993 a participação foi de 6%. Este mercado é composto basicamente, como na África, de sistemas rurais e aplicações profissionais remotas. A tabela 4 mostra os 10 primeiros países que possuem maior capacidade instalada de módulos fotovoltaicos

**Tabela 4 – 10 primeiros países com maior capacidade instalada**

<b>Páís</b>	<b>Potência Instalada (MWp)</b>
Japão	205,3
EUA	117,3
Alemanha	89,5
Austrália	25,3
Itália	18,5
Suíça	13,4
México	12,9
Holanda	9,2
França	9,1
Espanha	9,1

### **Distribuição da utilização por aplicação**

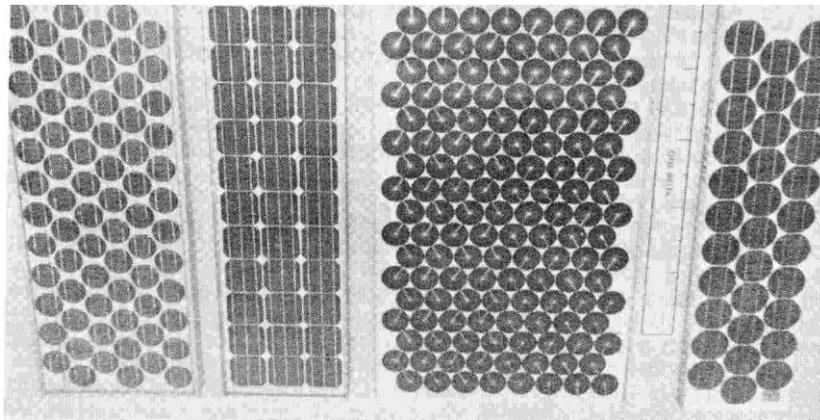
- Conectado à rede - 36%
- Autônomo - . Eletricção . Rural - 27%
- Aplicação Técnica - 28%
- Equipamentos: 9%

## **6 - MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E SUAS APLICAÇÕES**

As células fotovoltaicas são encapsuladas em módulos. O empacotamento é feito para que fiquem protegidas das intempéries, principalmente da umidade do ar.

Cada célula solar gera, aproximadamente 0,4 volts (silício). Voltagens mais altas, como já mencionado, são produzidas quando várias células são conectadas em série . Para carregar baterias de 12 V, módulos fotovoltaicos devem produzir aproximadamente 16V devido às perdas que ocorrem nos cabos e diodos de bloqueio (diodos que protegem as células de uma inversão na corrente). Dessa forma os módulos, atualmente em operação, contêm entre 28 e 40 células de silício cristalino. O dispositivo de filme fino produz voltagem mais alta do que a forma cristalina, podendo os módulos possuírem menos do que 28 células.

É importante considerar a geometria das células, já que devem ocupar o máximo de área possível do módulo. Atualmente existem células quadradas e redondas em operação. As quadradas ocupam melhor espaço nos módulos, enquanto as redondas têm a vantagem de não sofrerem perda de material, devido à forma cilíndrica do silício cristalino. A figura 17 mostra um foto de diversos módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado.

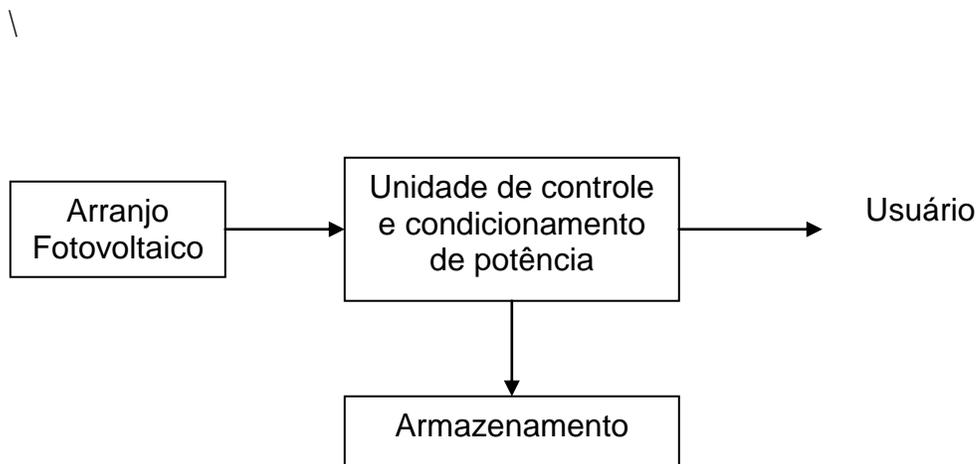


**Figura 17 – Diferentes módulos disponíveis no mercado**

### 6.1 Configuração básica de um sistema solar fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico é composto não apenas do arranjo fotovoltaico, mas de outros componentes que permitem entregar a energia elétrica gerada à carga.

A figura 18 mostra um esquema de configuração de um sistema fotovoltaico básico.



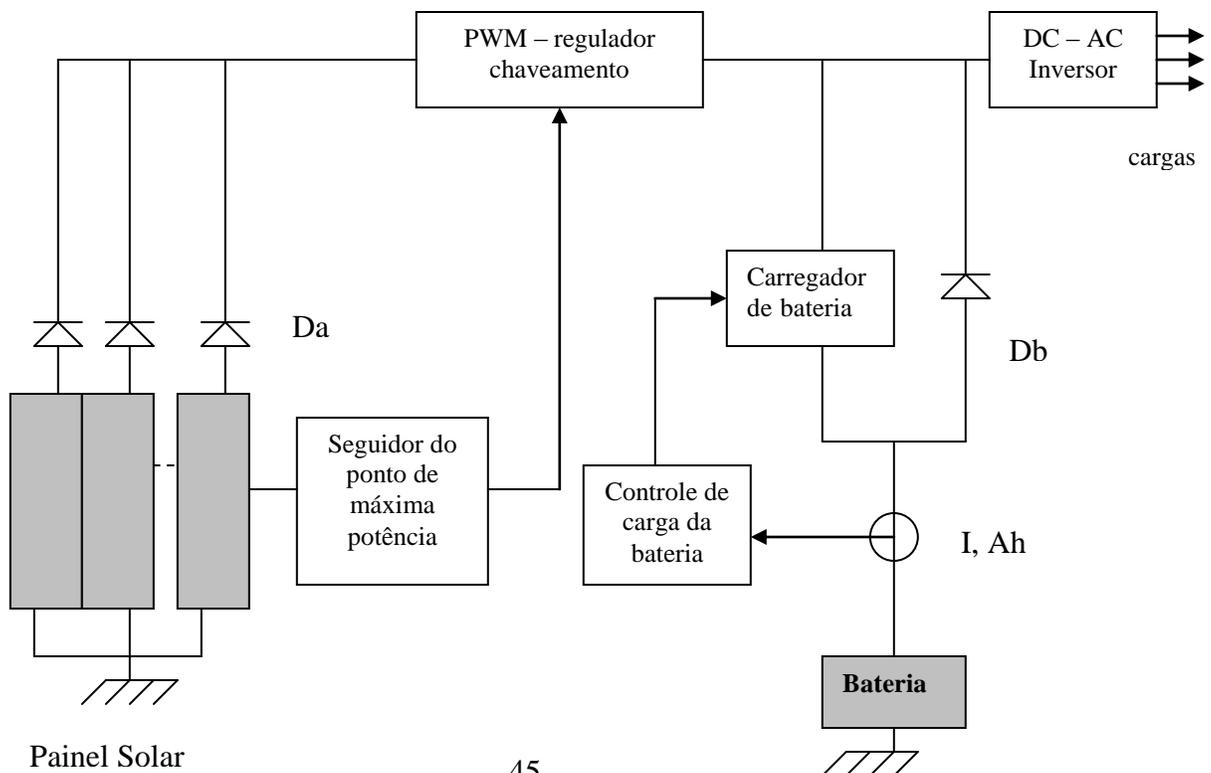
**Figura 18 – Esquema de um sistema fotovoltaico básico**

O **arranjo fotovoltaico** consiste numa associação de módulos, conexões, diodos de proteção e estruturas de suporte. O módulo é o dispositivo gerador propriamente dito, que como visto, consiste num conjunto de células fotovoltaicas interligadas e conectadas. A estrutura de sustentação dos módulos utiliza materiais comuns tais como madeira, aço galvanizado ou alumínio, por exemplo. Além do suporte, a estrutura deve permitir o

agrupamento e interligação dos módulos de forma simples. Podem ainda estar presentes no arranjo, dispositivos de orientação do painel segundo o movimento do Sol. O rastreamento do Sol pode ser parcial, ou seja, movimento em torno de um eixo (Leste – Oeste) durante o dia, e rastreamento total com acompanhamento também do movimento do Sol de Norte a Sul durante as estações do ano. O uso de rastreador pode aumentar em torno de 40% a energia produzida durante o ano. Entretanto introduz no sistema um componente móvel sujeito à manutenção além de encarecer o custo do sistema.

O **sistema de condicionamento de potência**, conhecido como PCS (Power Conditioning System), coleta a energia gerada pelo arranjo dos módulos na forma CC e a leva, na forma, CC ou CA para a carga. É composto de vários dispositivos normalmente acoplados fisicamente. Suas funções são controlar o acionamento-desligamento, o ponto de operação do arranjo fotovoltaico, controle de carga da bateria, a proteção do sistema, a conversão da corrente contínua em corrente alternada.

A figura 19 mostra os componentes necessários de um sistema fotovoltaico autônomo. A seção seguinte descreve com detalhes as funções e características elétricas dos destes componentes.



## Figura 19 - Componentes principais de um sistema fotovoltaico

### 6.2 Componentes básicos de um sistema fotovoltaico

#### 6.2.1 Baterias

Muitos tipos de baterias são utilizados para aplicações em sistemas fotovoltaicos. Embora alguns tipos mais exóticos estão disponíveis atualmente, as baterias de chumbo-ácido ainda são as mais utilizadas em função do seu menor custo e maturidade. Também as de níquel cádmio tem aumentado a sua participação em aplicações fotovoltaicas que requerem baterias do tipo selada capazes de operarem em qualquer posição e alta densidade de energia. Sua principal desvantagem com relação à de chumbo-ácido é o custo que é bem mais elevado. Tecnologias como níquel-ferro, sódio-enxofre e níquel-hidrogênio têm sido consideradas como promissoras. A seguir são descritas com mais detalhes as duas tecnologias mais empregadas em sistemas fotovoltaicos.

#### Baterias de chumbo-ácido

A células de chumbo-ácido utilizam dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ) como material ativo da placa (eletrodo) positiva e chumbo metálico ( $Pb$ ), numa estrutura porosa altamente reativa, como material ativo da placa (eletrodo) negativa. Estas placas são imersas em uma solução diluída de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), que se comporta como eletrólito (mistura de 36% de ácido sulfúrico e 64% de água)

Durante a descarga, o ácido sulfúrico reage com os materiais ativos das placas, produzindo água que dilui o eletrólito. Durante o carregamento, o processo é revertido; o sulfato de chumbo ( $PbSO_4$ ) de ambas as placas é transformado em chumbo “esponjado”, dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ) e ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).

Quando a bateria está completamente carregada e a maioria do ácido sulfúrico foi convertida em chumbo e dióxido de chumbo, começa a produção dos gases hidrogênio e oxigênio. Isto acontece, pois todo o material ativo da placas positivas foi completamente utilizado, de maneira que elas não são mais capazes de converter a corrente de carga em energia eletroquímica. Neste momento, a tensão da célula torna-se maior que a tensão de gaseificação e têm início as reações de sobrecarregamento, acelerando a produção de hidrogênio e oxigênio e a conseqüente perda de água.

A densidade do eletrólito varia durante o processo de carga e descarga e valores típicos são apresentados abaixo:

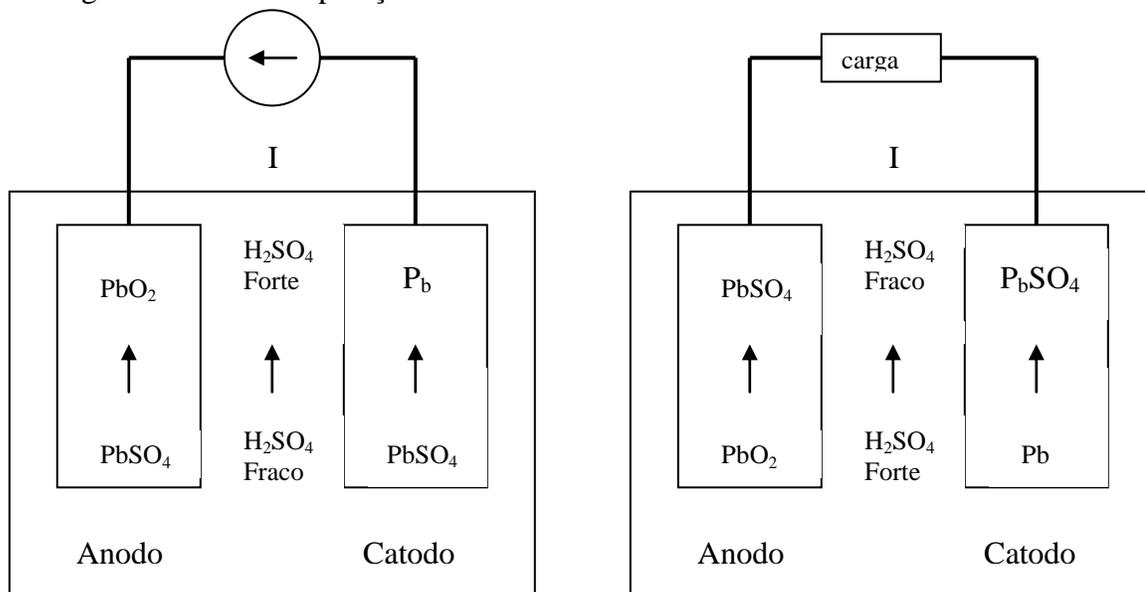
**Condição da célula**

|

**Densidade ( $gr/cm^2$ )**

Completamente descarregada	1,12
Completamente carregada	1,28

A figura 20 mostra a operação básica de uma célula de chumbo-ácido.



a) processo de carga

b) processo de descarga

**Figura 20 - . Processo de carga e descarga de uma célula de chumbo-ácido**

Em uma bateria de chumbo ácido o eletrólito participa de forma ativa no processo eletroquímico, variando a proporção de ácido na solução com o estado da carga do acumulador. Quando a bateria está descarregada, a quantidade de ácido na solução diminui. Se a bateria está carregada, a quantidade de ácido na solução aumenta. Este mecanismo tem uma aplicação prática: monitorando-se a concentração de ácido pode-se determinar o estado da carga da bateria. Esta monitoração é feita por um densímetro.

A bateria de chumbo-ácido é encontrada em várias versões. A versão de ciclo raso é usada em aplicações automotivas onde descargas rápidas com elevadas taxas de corrente e reduzida profundidade de descarga é utilizada na partida dos motores. A versão de ciclo profundo é adequada em aplicações que requerem repetidos ciclos de carga e descarga completos. Muitas das aplicações requerem baterias de ciclo profundo. As baterias de chumbo ácido podem também ser encontradas na versão “seladas”, ou sejam possuem o eletrólito confinado no separador ou sob a forma de GEL. Este tipo de bateria não necessita de adição de água. Também a versão aberta, que é mais barata é utilizada, porém, limitada ao uso na posição vertical, pois do contrário, o eletrólito que é livre (não confinado no separador), pode vazar. Estas precisam de verificação periódica do nível do eletrólito.

**Efeito da temperatura:** Quando a temperatura aumenta, a capacidade total também aumenta. Isto se constitui em vantagem, porém, acarreta alguns inconvenientes tais como o aumento da taxa de descarga, redução do ciclo de vida e sulfatação acelerada em baterias que não estão totalmente carregadas.

*Tensões características de células e baterias de chumbo –ácido*

Tensões características	Tensões a 20°C (V)	
	Célula	Baterias com seis células
Nominal	2	12
Tensão máxima	2,3 – 2,5	14,0 – 15,0
Tensão flutuação	2,2 – 2,3	13,0 – 14,0
Tensão de circuito aberto com carga plena	2,1-2,2	12,5-13,0
Tensão medida para limite da capacidade	1,8-1,9	10,8-11,4
Mudança das características de tensão com a temperatura	-00,5 V para cada 10 <sup>0</sup> c de aumento	-0,33V para cada 10 <sup>0</sup> C de aumento

**Sulfatação:** Formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas das células. A sulfatação reduz permanentemente a capacidade da célula.

### Baterias de níquel-cádmio

As baterias de níquel-cádmio usam hidróxido de níquel nas placas anodo e óxido de cádmio nas placas catodo numa estrutura similar às baterias de chumbo-ácido. No eletrólito é utilizado hidróxido de potássio. A reação completa de descarga nos eletrodos é dada por:



A operação é revertida na operação de carga. A voltagem da célula completamente carregada é de 1,29 volts. Este tipo de bateria pode ser totalmente descarregado e não sofre influência da temperatura.

### *Tensões características de células e baterias de níquel-cádmio*

Tensões características	Tensões a 20 <sup>0</sup> C (V)	
	Célula	Bateria com dez células
Nominal	1,25	12
Tensão máxima para baterias abertas	1,50-1,65	15,0 – 16,5
Tensão de flutuação para baterias abertas	1,40 – 1,45	14,0 – 14,5
Corrente de carregamento para baterias seladas	C/10	C/10
Tensão de circuito aberto para os diversos estados de carga	1,20 – 1,35	12,0-13,5
Tensão limite	0	9

#### **Vantagens:**

- Baixo custo de manutenção
- Maior vida útil
- Podem sofrer ciclos profundos e ser deixadas descarregadas
- Temperaturas elevadas têm menor efeito do que em baterias chumbo-ácido

#### **Desvantagem**

- Custo inicial maior
- Meios de medição do estado da carga não são simples

### **Características básicas que definem a performance das baterias**

#### **Eficiência**

Relação entre a saída útil e a entrada. Pode ser expressa de três formas a saber:

**Eficiência Coulômbica ou de Amper-hora (Ah).** Relação entre a quantidade de Ah retirados de uma célula durante a descarga e a quantidade necessária para restaurar o estado de carga inicial.

**Eficiência de tensão.** Relação entre a tensão média durante a descarga de uma célula ou bateria e da tensão média durante a carga necessária para restaurar a capacidade inicial.

**Eficiência de energia ou Watt-hora (Wh)** – relação entre a energia retirada da bateria durante o processo de descarga e a energia necessária para restaurar o estado de carga inicial.

### **Taxa de carga e descarga**

A taxa de carga é o valor da corrente aplicado a uma célula ou bateria durante o processo de carga. Esta taxa é normalmente normalizada em relação a capacidade nominal da bateria. Por exemplo, uma taxa de carga de 10 horas para uma bateria de 500 Ah de capacidade nominal é expressa da seguinte forma:

$$\frac{\text{Capacidade Nominal}}{\text{Intervalo de carga}} = \frac{500 \text{ Ah}}{10 \text{ horas}} = 50 \text{ Amps} = \text{taxa C/10}$$

A taxa de descarga é definida como o valor da corrente durante o processo de descarga de uma bateria. Esta taxa pode ser expressa em ampères mas é mais comumente encontrada normalizada pela capacidade nominal da bateria.

### **Estado da carga e profundidade de descarga**

O **estado da carga** representa a capacidade disponível em uma bateria expressa como porcentagem da capacidade nominal. Por exemplo, se 25 Ah foram retirados de uma bateria de capacidade nominal de 100 Ah, o novo estado da carga é de 75%.

A **profundidade de descarga** é o valor complementar do estado da carga. Indica em termos percentuais, quanto da capacidade nominal da bateria foi retirado a partir do estado de plena carga. Por exemplo, a remoção de 25 Ah de uma bateria de capacidade nominal de 100 Ah resulta em uma profundidade de descarga de 25%.

### **Vida útil**

Pode ser expressa em duas formas, número de ciclos ou período de tempo, dependendo do tipo de serviço para o qual a bateria foi especificada. Para o primeiro caso, a vida útil é o número de ciclos, com uma determinada profundidade de descarga, a que uma bateria pode ser submetida antes de apresentar falhas em satisfazer às especificações.

### **Principais figuras de avaliação de baterias recarregáveis:**

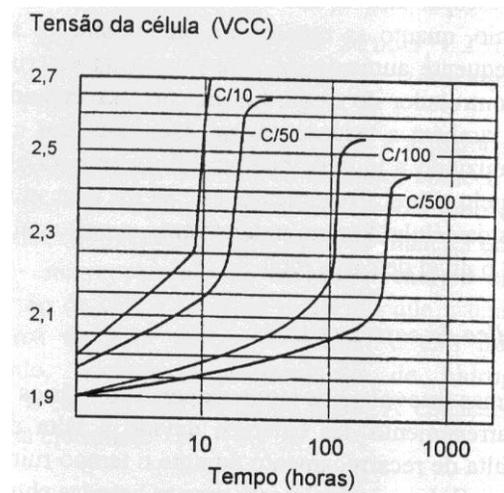
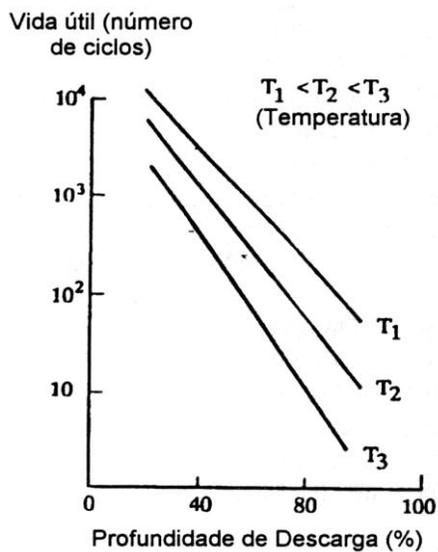
- Densidade de energia (volumétrico ou peso),
- Eficiência, Capacidade,
- Vida Cíclica,
- Taxa de Auto descarga,
- Reciclabilidade dos Materiais

- Custo.

**Fatores mais importantes que afetam o desempenho, a capacidade e a vida útil de qualquer bateria recarregável:**

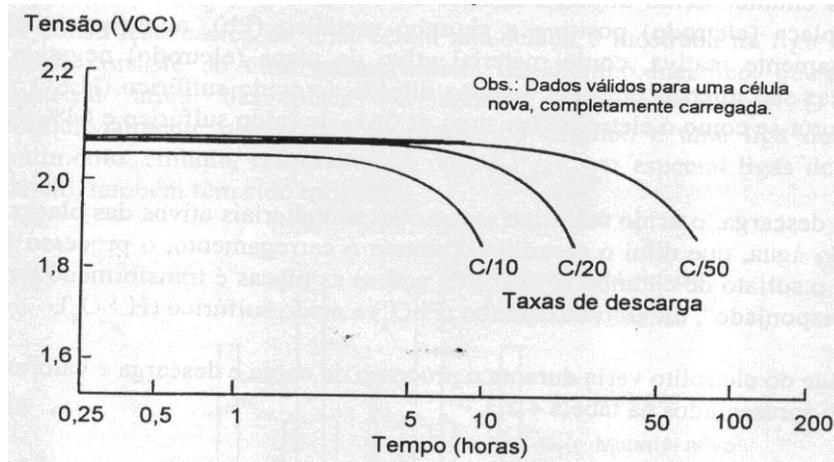
- Profundidade de descarga ( por ciclo)
- Temperatura
- Vida cíclica
- Controle de carga / descarga
- Manutenção periódica

As figuras 21 (a) e (b) mostram respectivamente a Curvas típicas da influência da profundidade de descarga e temperatura na vida útil da bateria e perfil típico da tensão durante o carregamento de uma bateria chumbo-ácido aberta com várias taxas de carga



**Figura 21 a) - Vida útil versus temperatura e profundidade de descarga e b) tensão da célula de chumbo-ácido durante o seu carregamento**

A figura 22 mostra o perfil típico de tensão de uma célula chumbo ácido durante o processo de descarga



**Figura 22 – Perfil típico de tensão de uma célula chumbo-ácido durante o processo de descarga**

### **Característica ideal das baterias para trabalhar em sistema fotovoltaicos**

A operação de uma bateria, usada em um sistema solar fotovoltaico, deve atender a dois tipos de ciclos:

- Ciclos rasos a cada dia
- Ciclos profundos por vários dias (tempo nublado) ou semanas (durante o inverno)

As seguintes características devem ser observadas para que as baterias tenham um bom desempenho quando instaladas em um sistema solar fotovoltaico:

- Elevada vida cíclica para descargas profundas
- Necessidade de pouca ou nenhuma manutenção
- Elevada eficiência de carregamento
- Capacidade de permanecer completamente descarregada
- Baixa taxa de auto-descarga
- Confiabilidade
- Mínima mudança de desempenho, quando trabalhando fora da faixa de temperatura e operação

Outros fatores que também devem ser considerados, no momento de escolher a bateria adequada para esta aplicação.

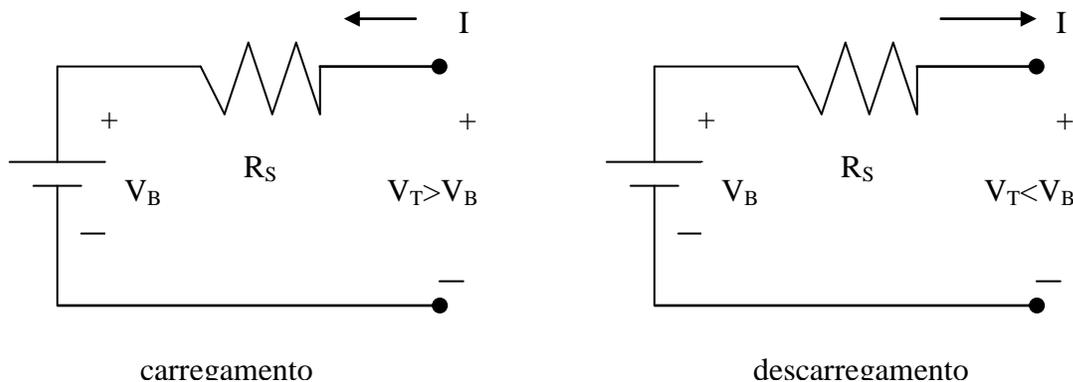
- Disponibilidade dos fornecedores
- Distância, duração e custo do transporte para o local
- Custo da capacidade útil para um ciclo
- Custo da capacidade útil para um ciclo de vida
- Necessidade de manutenção durante o armazenamento
- Peso
- Densidade de energia
- Disponibilidade e custos de unidade de controle, se necessário

### 6.2.2 Controlador de carga

Na maioria dos sistemas que possuem bateria, o controlador de carga é um componente essencial. O controlador deve desligar a carga quando a bateria alcança o seu nível mínimo especificado de descarga e, desconectar o arranjo fotovoltaico quando a bateria atinge o nível máximo permitido de carregamento. Quando, para atender as necessidades de carga é necessária a instalação de uma certa quantidade de baterias ligadas em série e paralelo, o processo de controle se torna bastante desafiador.

O controlador deve ser ajustado para manter um bom desempenho das baterias sob regime de carga e descarga e temperatura diversas.

A tensão nos terminais de uma bateria sob várias condições de carga e descarga foi apresentada nas figuras 21-b e 22. Os resultados podem ser utilizados para determinar o circuito equivalente de Thevenin para o conjunto de baterias mostrados na figura 23.



**Figura 23. Circuito equivalente de Thevenin da bateria sob condições de carga e descarga**

Durante o processo de carga da bateria, a tensão nos seus terminais excede a tensão nas suas células, visto que a tensão nos terminais é a soma da tensão da células mais a queda na resistência interna. Durante o processo de descarga, a tensão nos terminais será menor

do que a tensão nas suas células devido a queda nas resistências internas. A tensão nas células da bateria é simplesmente a tensão de circuito aberto.

Os requisitos de carga e descarga se tornam mais complicados pelo fato de que o circuito equivalente de thevenin ( tensão de circuito aberto e resistência interna) do conjunto de baterias é dependente da temperatura . À medida que a temperatura decresce, a tensão de circuito aberto decresce e a resistência aumenta.

Para controlar estes parâmetros, o controlador de carga deve incorporar várias funções importantes, podendo algumas destas funções serem omitidas dependendo da aplicação.

- Desconectar o arranjo fotovoltaico quando a bateria atinge carga plena

Vamos assumir que a bateria está totalmente carregada quando a tensão nos seus terminais atinge 15 volts com uma corrente de carga específica. Também vamos assumir que quando os terminais da bateria atingem 15 volts, o painel fotovoltaico será desconectado da mesma e quando a tensão dos terminais da bateria cai abaixo de 15 volts, o painel fotovoltaico será conectado novamente. Note que quando o painel é desconectado dos terminais da bateria, a tensão nos terminais cai abaixo de 15 volts porque pois não há queda de tensão na resistência interna. O controle assume então que a bateria não está totalmente carregada e a mesma é novamente conectada ao painel fotovoltaico, que faz com que a tensão nos terminais exceda os 15 volts que por sua vez faz com que o painel fotovoltaico seja desconectado novamente. Este processo oscilatório continua até quando a bateria torna-se sobrecarregada ou até que um circuito adicional do controlador sente a oscilação e diminui a corrente de carga.

A figura 21 b e 22 mostra com a tensão nos terminais depende da taxa de carga ou descarga e do estado da carga da bateria.

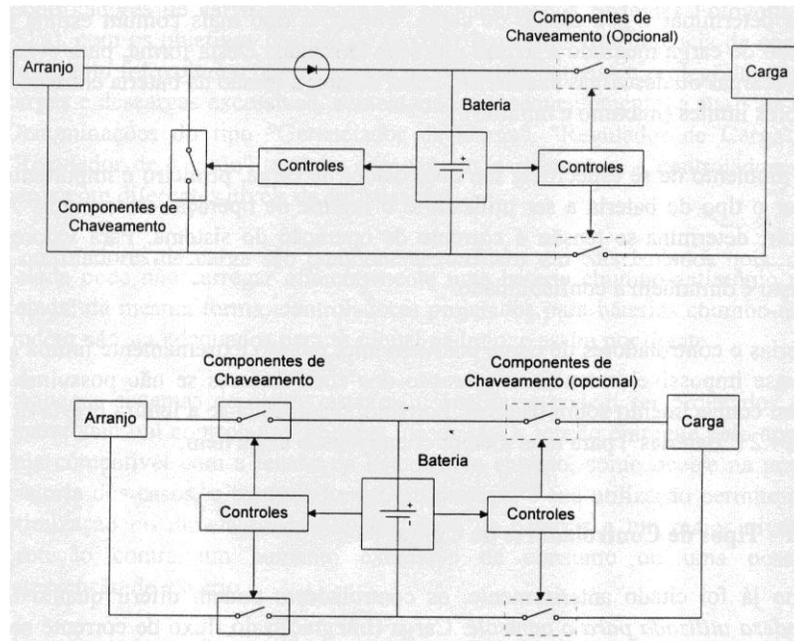
- Interromper o fornecimento de energia quando o estado de carga da bateria atinge um nível mínimo de segurança
- Monitorar o desempenho do Sistema Fotovoltaico (corrente e tensão de carregamento da bateria)
- Acionam alarmes quando ocorre algum problema

### **Tipos de controladores de carga:**

- *Quanto a grandeza utilizada para o controle:* carga (integração do fluxo de corrente na bateria), tensão e densidade do eletrólito

- Forma que o controlador utiliza para desconectar o painel fotovoltaico da bateria quando esta apresenta carga plena: Shunt ou Série
- Estratégia de controle: em controladores de carga comerciais está baseada na tensão instantânea nos terminais da baterias que é comparada ao limite superior e inferior.

A figura 23 mostra um arranjo típico de controlador de carga



**Figura 23 a) Regulador “ Shunt” com LVD Opcional e b) Regulador “ Série” com LVD Opcional**

## ESPECIFICAÇÃO DOS CONTROLADORES DE CARGA

Os parâmetros para especificação dos controladores de carga são obtidos da:

- Demanda de energia e
- Curvas de características das baterias, como as de carga e descarga e a de vida útil (em ciclos) desejada.

O mínimo necessário para se especificar o controlador:

- Os valores de corrente máxima, que deve ser maior do que a máxima corrente de curto-circuito esperada para o arranjo fotovoltaico,
- Tensão de operação do sistema são especificar o controlador;

Outras características desejáveis, mas nem sempre disponíveis nos modelos mais comuns:

- “Set points” ajustáveis
- Proteção contra corrente reversa
- Desconexão da carga ( Proteção Contra Descargas Excessivas)
- Compensação Térmica
- Alarmes e Indicações Visuais
- Desvio de energia do arranjo
- Seguidor do ponto de máxima potência
- Baixo consumo de potência
- Proteção contra inversão de polaridade

### 6.2.3 Inversor

Componente responsável pela conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Também conhecido como conversor CC-CA. É também mencionado na literatura como PCU – Power Conditioning Unit (Unidade de Condicionamento de Potência)

Tipos de conversores:

- Conversores estáticos (estado sólido)
- Conversores eletromecânicos (rotativos)

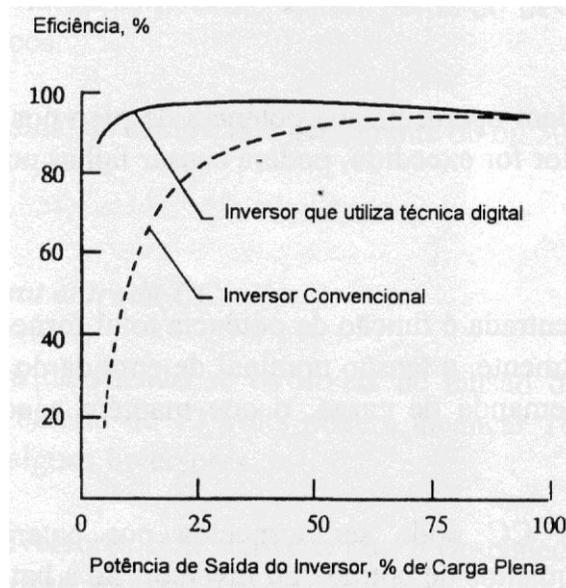
#### Tipos de inversores

<b>Tipo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Inversor auto-comutado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Podem operar conectados a rede elétrica ou alimentando cargas isoladas</li> <li>- Tenha melhor fator de potência</li> <li>- Produz menor quantidade de harmônicos</li> </ul>	Projeto do equipamento mais complexo
Inversor comutado pela rede	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Projeto mais simples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Depende da existência de tensão na rede</li> <li>- Requer correção do fator de potência e dos harmônicos</li> </ul>

## CARACTERÍSTICAS DOS INVERSORES

- *Forma de onda:* quadrada, quadrada modificada (retangular) e senoidal
- *Eficiência na conversão de potência*

A figura 24 mostra uma curva d eficiência de um inversor em função da potência



**Figura 24 – Curva de eficiência de um inversor**

- *Potência nominal de saída*
- *Taxa de utilização*
- *Tensão de entrada*
- *Tensão de saída*
- *Capacidade de surto*
- *Regulação de tensão*
- *Frequência*
- *Proteções:* a) *Sobre-tensão na entrada CC;* b) *sobrecargas e elevação de temperatura*

- *Modularidade*
- *Fator de potência*
- *Consumo de potência sem carga (consumo permanente)*

#### 6.2.4 Conversores CC - CC

**Aplicação mais comum:** Controlador de carga de baterias a partir da energia gerada por painéis solares.

##### **Outras funções:**

- Acoplado ao um sistema de controle “Seguidor do Ponto de Máxima Potência”: permite extrair do painel solar a máxima potência que está sendo gerada e com isso obter melhor rendimento do sistema
- Conversores tipo “Boost” – para elevar a tensão
- Conversores tipo “Buck” – para abaixar a tensão
- Obter com este conversor várias tensões de saída a partir de uma única tensão de entrada

A figura 19 mostra um sistema fotovoltaico mostrando os principais componentes discutidos até aqui. O seguidor de máxima potência capta a voltagem e corrente de saída do arranjo fotovoltaico e continuamente ajusta o ponto de operação para extrair a máxima potência sob variadas condições climáticas. Toda energia gerada no arranjo entra no inversor, que converte o sinal CC em AC. A geração em excesso, é usada para carregar as baterias. Quando a bateria atinge a plena carga e há sobra de geração, normalmente esta sobra é utilizada para alimentar outras cargas não essenciais. O carregador de bateria é normalmente um conversor CC-CC. Quando a geração de energia pelo arranjo é insuficiente, a bateria descarrega sua carga no inversor para atendimento da demanda. O diodo  $D_b$  é utilizado para evitar que a bateria continue carregando após atingir sua carga máxima. O diodo  $D_a$  tem a função de isolar o arranjo fotovoltaico da bateria, evitando que o mesmo funcione como carga da bateria durante o período noturno. O controlador de carga é o componente de maior importância no sistema, pois capta o sinal de corrente e tensão da bateria e arranjo fotovoltaico, controla o processo de carga e descarga da bateria controlando o conversor CC e a entrada e saída de cargas adicionais. Em sistemas conectados a rede elétrica, o excesso de energia é injetado na rede, sendo na maioria dos casos descartado o uso das baterias. Neste caso filtros são utilizados para filtrar o sinal que será injetado na rede livrando-o das harmônicas indesejáveis.

## 7- Aplicações da tecnologia fotovoltaica

As aplicações de um sistema fotovoltaico podem ser divididas em: Sistemas autônomos isolados e híbridos e sistemas conectados à rede elétrica;

### 7.1 Sistema autônomos

**1a- Sistemas autônomos isolados-** Consiste no sistema puramente fotovoltaico, não conectado à rede elétrica de distribuição. Dentre os sistemas isolados, existem muitas configurações possíveis. As configurações mais comuns são:

**Carga CC sem armazenamento** – A energia elétrica é usada no momento da geração por equipamento que operam em corrente contínua.

**Carga CC com armazenamento** – É o caso em que se deseja utilizar equipamentos elétricos, em corrente contínua, independente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea. Para que isto seja possível, a energia elétrica deve ser armazenada em baterias.

**Carga CA sem armazenamento** – Da mesma forma como apresentado para o caso CC, pode-se usar equipamentos que operem em corrente alternada sem o uso de baterias, bastando, para tanto, a introdução de um inversor entre o arranjo fotovoltaico e o equipamento a ser usado.

**Carga CA com armazenamento** – Para alimentação de equipamentos que operem em corrente alternada é necessário que se utilize um inversor. Um caso típico de aplicação destes sistemas é no atendimento de residências isoladas que, por possuírem um nível de conforto superior àquelas alimentadas em corrente contínua, permitem o uso de eletrodomésticos convencionais.

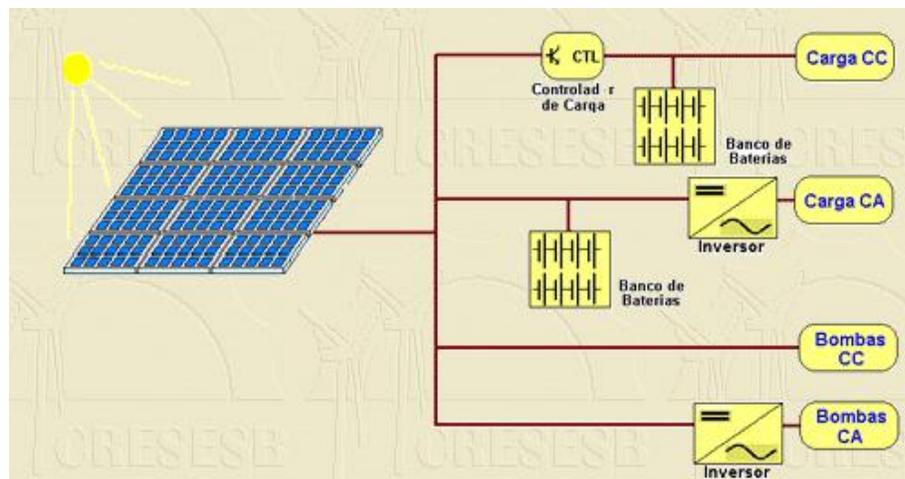


Figura 25 – Sistema autônomo isolado

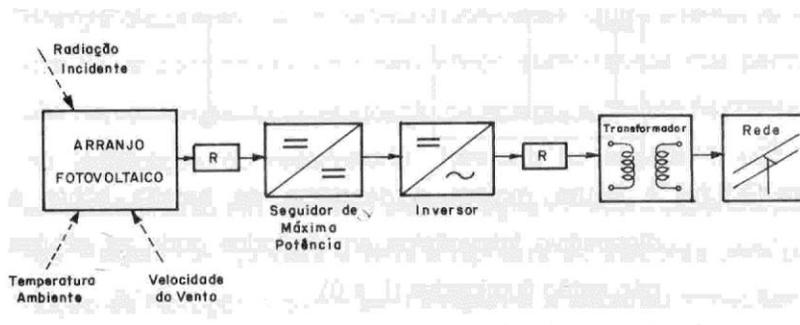
**1b- Sistema autônomo híbrido** – São sistemas onde a configuração não se restringe apenas à geração fotovoltaica. Em outras palavras, são sistemas que, estando isolados da

rede elétrica, existe mais de uma forma de geração de energia, como por exemplo, gerador diesel, turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos. Estes sistemas são mais complexos e necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação para o usuário.



**Figura 26 – Sistema autônomo híbrido**

**7.2 Sistemas Conectados à rede** – São basicamente de um único tipo e são aqueles em que o arranjo fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado. São sistemas que não utilizam armazenamento de energia, pois toda a potência gerada é entregue à rede instantaneamente. As potências instaladas vão desde poucos kWp em instalações residenciais, até alguns MWp em grandes sistemas operados por empresas. Estes sistemas se diferenciam quanto à forma de conexão à rede. A figura 27 mostra um diagrama de bloco de um esquema conectado à rede.

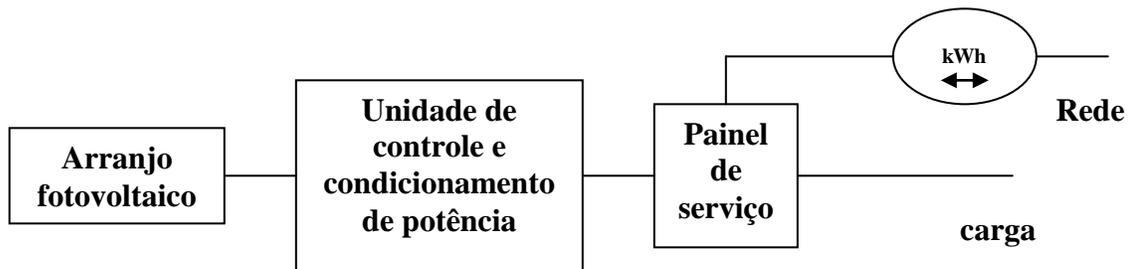


**Figura 27 – Diagrama de componentes de uma central fotovoltaica**

Em aplicações residenciais conectadas à rede, já comum em alguns países como Alemanha e EUA, a opção de conexão e a mesma depende da forma de remuneração da concessionária.

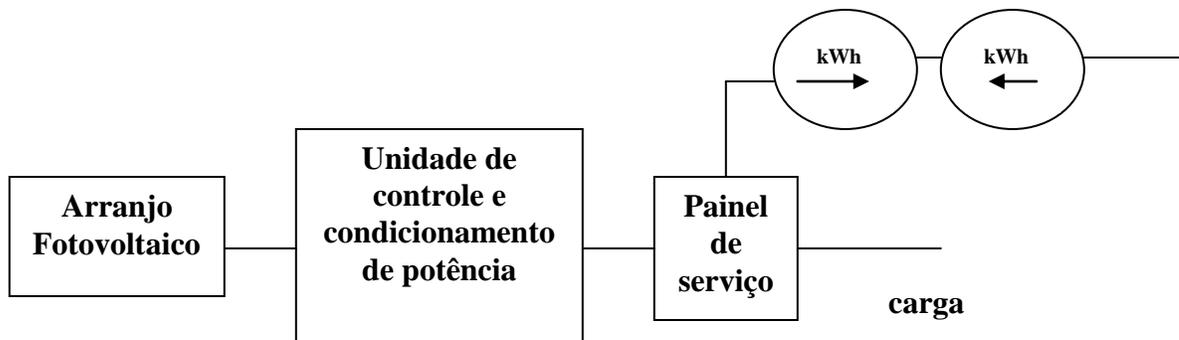
### Medição única de balanço de energia

Esta opção é usada quando a concessionária remunera a energia entregue pelo produtor fotovoltaico ao preço que este compra a energia da concessionária. Neste caso, como mostrado na figura 28, um único medidor (bidirecional) registra a entrada e a saída de energia elétrica na residência apresentando, ao final do período, o valor da diferença entre a energia consumida e a entregue à rede.



**Figura 28 – Medição única do balanço de energia**

Quando o preço da venda da energia elétrica do produtor fotovoltaico ao concessionário é diferente do preço cobrado por este último, são utilizados dois medidores unidirecionais. Observa-se que em cada instante apenas um dos medidores estará em operação dependendo da diferença instantânea entre demanda e potência gerada pelo sistema fotovoltaico.



**Figura 29 – Medição dupla**

Outras aplicações de células fotovoltaicas são:

**Produtos de consumo** - Esta aplicação abarca sistemas com baixa potência instalada, em geral menores que 10Wp. Podemos destacar como principais as calculadoras, relógios, lanternas e rádios portáteis.

**Aplicações profissionais** – Responsáveis por uma significativa parcela do mercado de células fotovoltaicas. Podemos destacar como principais os sistemas de telecomunicações (rádios, telefones remotos, estações repetidoras), sinalização marítima, cercas eletrificadas, entre outras.

## 7- Aplicações da tecnologia fotovoltaica

As aplicações de um sistema fotovoltaico podem ser divididas em: Sistemas autônomos isolados e híbridos e sistemas conectados à rede elétrica.

### 7.1 Sistema autônomos

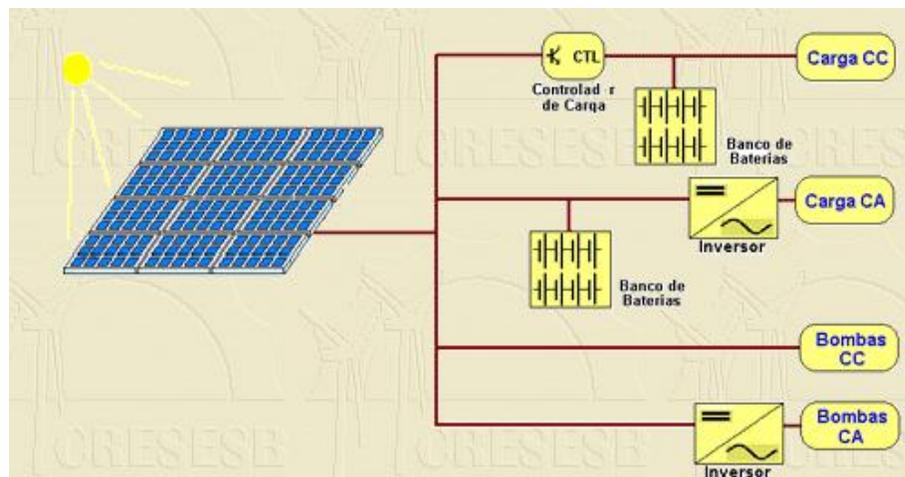
**1a- Sistemas autônomos isolados-** Consiste no sistema puramente fotovoltaico, não conectado à rede elétrica de distribuição. Dentre os sistemas isolados, existem muitas configurações possíveis. As configurações mais comuns são:

**Carga CC sem armazenamento** – A energia elétrica é usada no momento da geração por equipamento que operam em corrente contínua.

**Carga CC com armazenamento** – É o caso em que se deseja utilizar equipamentos elétricos, em corrente contínua, independente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea. Para que isto seja possível, a energia elétrica deve ser armazenada em baterias.

**Carga CA sem armazenamento** – Da mesma forma como apresentado para o caso CC, pode-se usar equipamentos que operem em corrente alternada sem o uso de baterias, bastando, para tanto, a introdução de um inversor entre o arranjo fotovoltaico e o equipamento a ser usado.

**Carga CA com armazenamento** – Para alimentação de equipamentos que operem em corrente alternada é necessário que se utilize um inversor. Um caso típico de aplicação destes sistemas é no atendimento de residências isoladas que, por possuírem um nível de conforto superior àquelas alimentadas em corrente contínua, permitem o uso de eletrodomésticos convencionais.



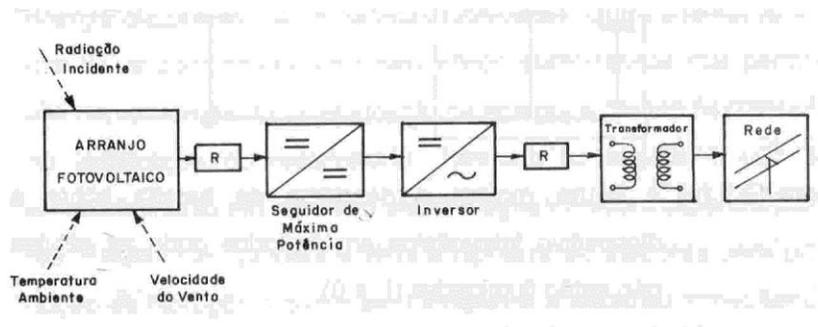
**Figura 25 – Sistema autônomo isolado**

**1b- Sistema autônomos híbridos** – São sistemas onde a configuração não se restringe apenas à geração fotovoltaica. Em outras palavras, são sistemas que, estando isolados da rede elétrica, existe mais de uma forma de geração de energia, como por exemplo, gerador diesel, turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos. Estes sistemas são mais complexos e necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação para o usuário.



**Figura 26 – Sistema autônomo híbrido**

**7.3 Sistemas Conectados à rede** – São basicamente de um único tipo e são aqueles em que o arranjo fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado. São sistemas que não utilizam armazenamento de energia, pois toda a potência gerada é entregue à rede instantaneamente. As potências instaladas vão desde poucos kWp em instalações residenciais, até alguns MWp em grandes sistemas operados por empresas. Estes sistemas se diferenciam quanto à forma de conexão à rede. A figura 27 mostra um diagrama de bloco de um esquema conectado á rede.

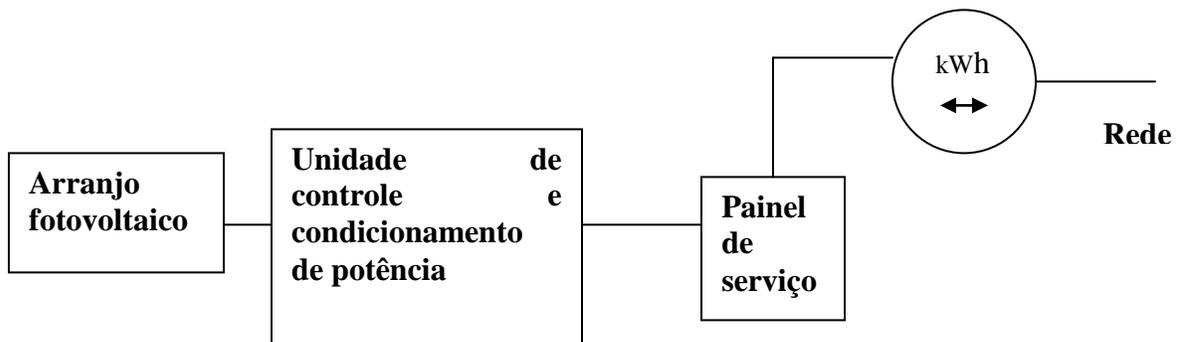


**Figura 27 – Diagrama de componentes de uma central fotovoltaica**

Em aplicações residenciais conectadas a rede, já comum em alguns países como Alemanha e EUA, a opção de conexão depende da forma de remuneração da concessionária.

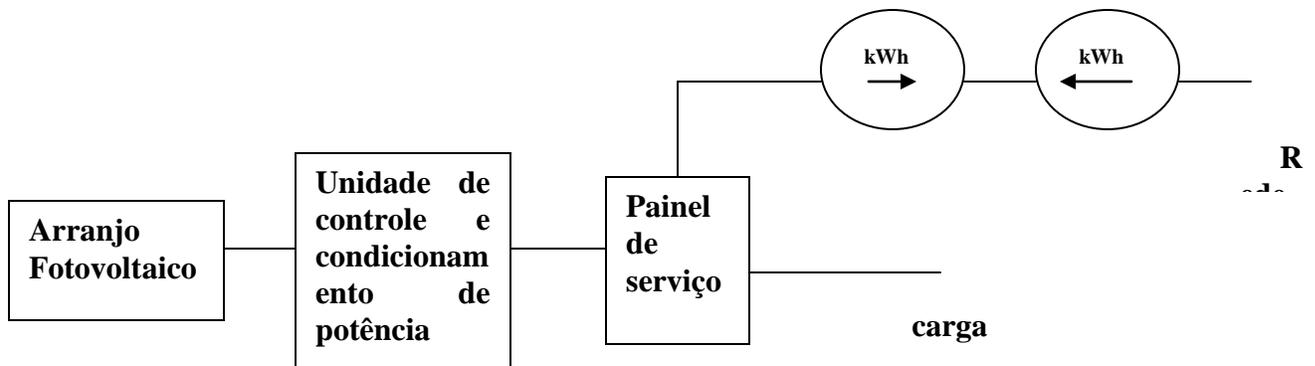
**Medição única do balanço da energia**

Esta opção é usada quando a concessionária remunera a energia entregue pelo produtor fotovoltaico ao mesmo preço que este compra a energia da concessionária. Nesta caso, como mostrado na figura 28, um único medidor (bidirecional) registra a entrada ou saída de energia elétrica na residência apresentando, ao final do período, o valor da diferença entre a energia consumida e a entregue.



**Figura 28 – Medição única do balanço de energia**

Quando o preço de venda da energia do produtor fotovoltaico ao concessionário é diferente do preço de compra, são utilizados dois medidores unidirecionais. Observa-se que em cada instante apenas um dos medidores estará em operação dependendo da diferença instantânea entre demanda e potência gerada pelo sistema fotovoltaico.



**Figura 29 – Medição dupla**

Outras aplicações de células fotovoltaicas são:

**Produtos de consumo** - Esta aplicação abarca sistemas com baixa potência instalada, em geral menores que 10Wp. Podemos destacar como principais as calculadoras, relógios, lanternas e rádios portáteis.

**Aplicações profissionais** – Responsáveis por uma significativa parcela do mercado de células fotovoltaicas. Podemos destacar como principais os sistemas de telecomunicações (rádios, telefones remotos, estações repetidoras), sinalização marítima, cercas eletrificadas, entre outras.

## 8. Projeto de um sistema fotovoltaico

Para se projetar um sistema fotovoltaico é necessário se ter um profundo conhecimento da carga, suas características, perfil ao longo dos dias e meses como também das características da radiação solar incidente no local. O critério de dimensionamento pode ser o de menor custo, maximização da energia suprida (confiabilidade) ou uma combinação de ambos.

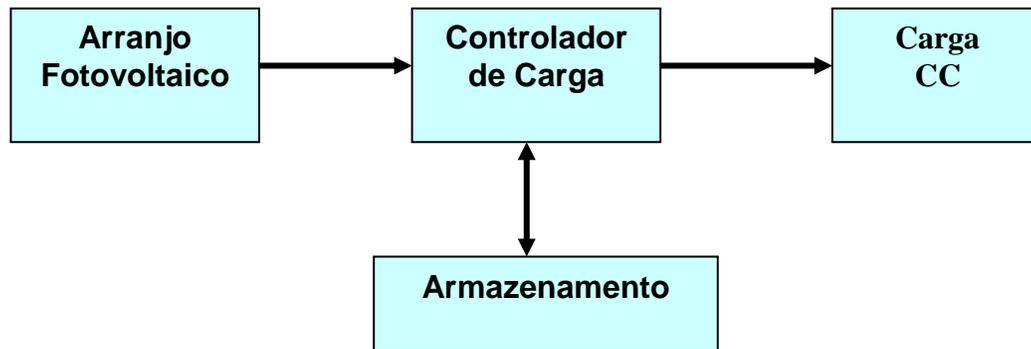
Em projetos de aplicação de pequeno porte, o dimensionamento é mais simplificado, baseando-se nos valores médio das cargas e radiação solar como, por exemplo: radiação diária ( $\text{kWh/m}^2$ ), média mensal ou valores típicos, e, comportamento médio da carga. Existem para isto planilhas que orientam passo a passo o dimensionamento do sistema

Para aplicações de médio e grande porte, onde os custos envolvidos são consideráveis, o projeto de um sistema fotovoltaico tem que ser baseado em métodos de cálculos mais complexos, onde faz necessário representar a carga e os níveis de radiação solar muitas vezes em base diária, numa representação casada entra ambos para que se faça um dimensionamento ótimo do sistema, ou seja, ao menor custo e com níveis de confiabilidade desejados, e também com a finalidade de medir e acompanhar o desempenho dos sistemas ao longo do tempo. Neste caso existem ferramentas computacionais que dimensionam o sistema fotovoltaico, em aplicações autônomas, híbridas e em conexão com a rede elétrica, de tal forma que cargas, radiação solar e sistema gerador são representados de uma forma mais detalhada, inclusive com a representação das perdas dos diversos componentes.

Pode-se dividir o projeto de um sistema fotovoltaico em três etapas:

- 1- Avaliação do recurso solar
- 2- Estimativa e avaliação da curva de carga
- 3- Escolha da configuração do sistema e critério de projeto
- 4- Dimensionamento dos componentes do sistema

Apresenta-se a seguir um método simplificado para dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado com armazenamento para alimentação de cargas CC. Abaixo se apresenta um diagrama de blocos deste tipo de sistema. O exercício ao final desta seção, apresenta passo a passo um projeto considerando carga AC e CC.



**Figura 30 – Sistema isolado com armazenamento e cargas CC**

### **1- Avaliação do recurso solar**

Em aplicações para suprimento de pequenas demandas, os módulos são instalados em posição fixa, orientados para o hemisfério norte (módulos instalados no hemisfério sul) com inclinação segundo a latitude do local e perfil de demanda. Em projetos de maior porte, pode-se tornar viável economicamente instalar sistema seguidor do movimento do sol de acordo com a hora do dia e com o dia do ano (movimento em dois eixos: Leste-Oeste; Norte-Sul). A figura 31 ilustra ângulo de posicionamento do sol com relação à abertura do plano do painel.

A corrente gerada pelo módulo é dada pela expressão  $I = I_0 \cdot \cos \theta$ ; onde  $I_0$  é a corrente gerada com o ângulo de incidência do sol normal à superfície horizontal e  $\theta$  é o ângulo de incidência do sol com relação à normal. Para ângulos de incidência do sol acima de  $50^\circ$ , a energia gerada desvia significativamente da lei do co-seno. Por exemplo, para ângulo igual a  $50^\circ$ , o co-seno é igual a 0,5, porém, a energia gerada é igual a 0,45 da gerada com ângulo de incidência normal à superfície.

Normalmente, as estações meteorológicas fornecem a radiação solar total incidente do plano horizontal, assim sendo é necessário corrigir esta radiação no plano de abertura do painel.

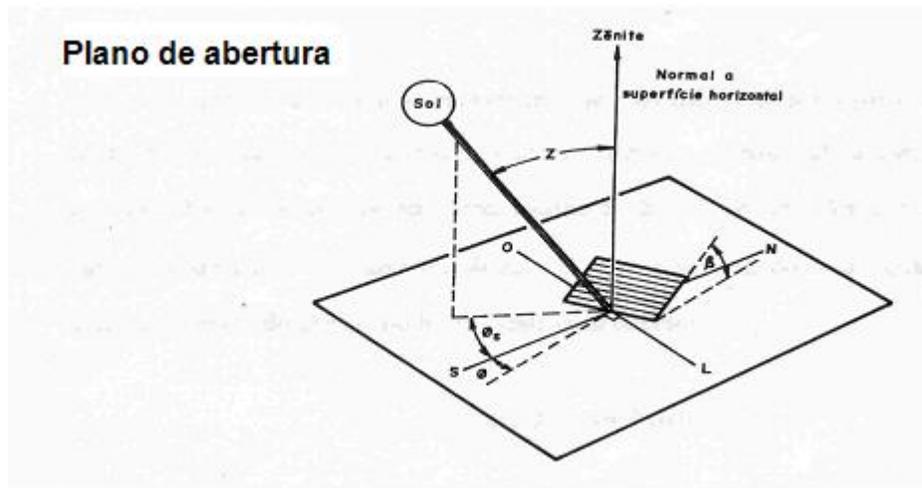


Figura 31 - Figura ilustrativa do Plano de abertura

Portanto como exemplo, supomos utilizar uma radiação solar horária de  $5,6 \text{ kWh/m}^2$  (plano horizontal), inclinação segundo a latitude do local de  $42^\circ$ , situado no hemisfério sul. A seguinte correção deverá ser feita para obter a radiação solar incidente no plano de abertura do painel.

$$\text{Radiação solar incidente no plano de abertura} = 5,6 \text{ kWh/m}^2 \times \cos 42^\circ = 4,16 \text{ kWh/m}^2$$

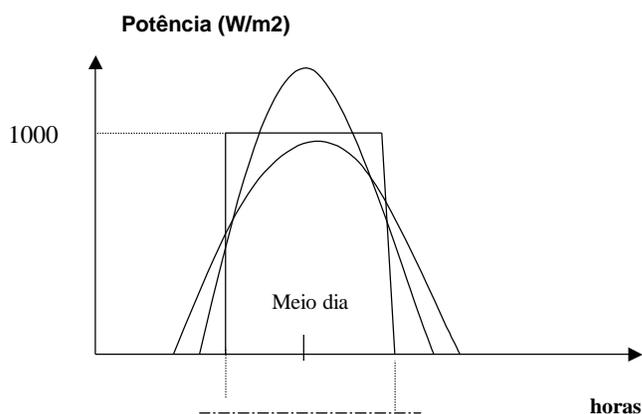
Equipamentos mais sofisticados fornecem também a radiação solar segundo as suas componentes difusa e refletida num plano pré-estabelecido. O conhecimento destas componentes é útil quando se deseja instalar seguidores do movimento do sol nos dois eixos. Existem disponíveis modelos que transformam:

- Radiação no plano horizontal em valores segundo inclinação desejada
- Valores estimados de radiação difusa e refletida a partir do valor global medido
- Estimativa de valores horários a partir de valores diários

Os dados de radiação solar também são especificados em termos de fluxo de potência ( $\text{kW/m}^2$ ), valor médio ao longo do dia, e energia acumulada ao longo de um dia em número de horas de sol pleno – SP. Esta grandeza reflete o número de hora em um dia em que a radiação solar dever permanecer em  $1000 \text{ Watts/m}^2$ , de forma que a energia resultante seja a mesma coletada naquele dia. O SP pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\text{EX: } \frac{6 \text{ kWh/m}^2}{1 \text{ kW/m}^2} = 6 [\text{horas/dia}]$$

A figura 32 demonstra o cálculo apresentado acima



**Figura 32 - Perfis de radiação solar com valores equivalentes de SP**

## 2- Estimativa da demanda

Para dimensionamento do sistema de geração precisamos analisar as características da demanda, potência nominal, perfis de consumo ao longo dos meses. A forma mais comum de se especificar uma carga é através do seu consumo diário de energia. Uma forma de avaliar a carga é através do produto do consumo nominal dos equipamentos, expressos em ampères, e do tempo de utilização em bases diária. O consumo pode também ser expresso em Watt-hora. Ex: Consumo (Con) de uma lâmpada de 20 Watts e tensão nominal 12 volts e, com 5 horas de operação diária:

$$\text{Con[ah]} = 5 \text{ horas} \times \frac{20[\text{watts}]}{12[\text{volts}]} = 8,33 \text{ [ah]}$$

Outro fator importante na avaliação da carga é a determinação dos valores extremos de consumo (máximo e mínimo) para que os componentes possam ser dimensionados segundo as condições críticas de operação. Além disso, deve-se pensar que todos os equipamentos poderão ser acionados ao mesmo tempo. Tensão nominal e características adicionais sobre os equipamentos (CA ou CC, eficiências, etc) “fecham” a especificação da carga.

Como já mencionado, vários programas de dimensionamento e simulação de operação de sistemas fotovoltaicos podem trabalhar numa base horária, ou seja, com a carga e o recurso solar sendo especificados a cada hora e por um período que pode variar de um dia a vários anos.

## 2 – Dimensionamento do sistema de armazenamento - Baterias

O processo de dimensionamento de um banco de baterias é iterativo. O projetista oscila entre a escolha do modelo (tecnologia, capacidade) e o cálculo do número de unidades necessárias para um dado sistema, considerando aspecto de vida útil, confiabilidade e custo.

Os parâmetros mais importantes para o dimensionamento do banco de baterias são a eficiência, a máxima profundidade de descarga (para ciclos diários e ciclos esporádicos) e autonomia do sistema.

- **Eficiência** – Existem dois valores de eficiência para uma bateria: a de Wh e a de Ah. A primeira situa-se em torno de 85% enquanto a segunda aproxima-se dos 100%. Ambas sofrem redução quando a bateria está com estado de carga próxima à carga plena (100%). Baixas temperaturas também tendem a reduzir a eficiência das baterias.
- **Máxima profundidade de descarga permitida** – Existem dois limites que são normalmente estabelecidos para a máxima profundidade de descarga: o cíclico (diário) e o esporádico. Estes limites, normalmente expressos como percentuais da capacidade nominal da bateria, vão depender da expectativa de vida desejada para a mesma. Quanto mais profundo o ciclo, mais curta a vida da bateria. Os ciclos esporádicos correspondem aos períodos críticos de geração solar e, embora a vida da bateria esteja ligada a ciclagem diária, o projetista deve avaliar o efeito dos mesmos no desempenho.
- **Número de dias sem Sol** – Este valor corresponde a uma previsão do maior período possível de consumo de energia com geração solar insuficiente para repor o estado de carga inicial das baterias, como uma determinada taxa de risco. Em outras palavras, as baterias devem ser dimensionadas para suprir a demanda durante os dias em que a geração de energia é insuficiente.

A capacidade das baterias pode ser determinada pela seguinte equação:

$$C_B = \frac{Con \times NDS}{AD \times \eta_B \times \eta_I}$$

onde:

$C_B$  – capacidade das baterias em Ah

Con – consumo diário (Ah)

NDS – número de dias sem Sol

AD – profundidade de descarga

$\eta_B$  - rendimento da bateria

$\eta_F$  - eficiência do inversor ( em aplicações de corrente alternada)

### 3- Dimensionamento da geração fotovoltaica

De posse dos dados meteorológicos de relevância e da expectativa de demanda de energia para o sistema, parte-se para o dimensionamento do painel fotovoltaico. Trata-se também de um processo iterativo onde o projetista oscila entre a escolha do modelo e o cálculo do número de unidades necessárias para um dado sistema, considerando aspectos como vida útil, confiabilidade e custo. A escolha do tipo e do número de módulos fotovoltaicos a serem utilizados depende de uma série de fatores, dentre eles:

- tensão nominal do sistema
- curva característica  $I \times V$  do módulo
- custo da área disponível para instalação
- degradação da performance em função da temperatura ambiente e idade dos módulos
- custo e expectativa de vida para o módulo.

O processo de determinação da capacidade instalada dos módulos divide-se basicamente em duas partes. A primeira consiste na determinação da inclinação do arranjo e do mês crítico (de acordo com os dados estimados ou medidos de radiação solar para o local) e a segunda consiste na determinação do número de módulos.

Os parâmetros mais importantes para o dimensionamento são:

- consumo calculado para a carga
- radiação solar global no plano do painel
- eficiência do banco de baterias
- perdas causadas por componentes adicionais ( depende da configuração)

A determinação da energia gerada pela painel solar pode ser feita pela seguinte equação:

$$E_g = \frac{Con}{\eta_B \times \eta_I \times \eta_F}$$

Onde:

$E_g$  – energia gerada pelo painel (kWh)

Con – consumo diário de energia (kWh)

$\eta_I$  - eficiência do inversor ( em aplicações de corrente alternada)

$\eta_F$  - perdas na fiação

A potência instalada pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$P = \frac{E_g}{SP}$$

Onde:

P – potência instalada em kW

SP – horas máximas de radiação ( Ex: radiação solar diária média incidente no pior mês de  $5 \text{ kWh/m}^2 = 5 \text{ horas de } 1\text{kW/m}^2$  (radiação máxima incidente)

A energia anual gerada pelo painel pode ser expressa por:

$$EG = P \times FC \times 8760\text{h/ano} \times DI \text{ ( kWh)}$$

Onde:

EG – energia anual gerada ( kWh)

FC – fator de capacidade do sistema (INS/24)

8760 – número de horas no ano

DI – disponibilidade do sistema (número de horas/ano em que o sistema está disponível)

Além do dimensionamento do painel e sistema de armazenamento, o projetista vai confrontar-se com a especificação dos controladores de carga e sistema de condicionamento da potência. Estes componentes, que se integram ao sistema em função do tipo de aplicação e/ou configuração, precisam de uma correta especificação para uma boa operação.

A metodologia apresentada acima, é como já mencionado, simplificada, e é a utilizada para dimensionar sistemas de pequeno porte. Tal metodologia por se basear em valores médios dos componentes, muitas vezes conduz a um dimensionamento que se costuma chamar de “não ótimo”, ou seja, maximiza a confiabilidade, além da necessária, sobredimensionando os componentes o que conduz a um custo elevado. A seção seguinte, apresenta a título de conhecimento uma metodologia mais adequada para um dimensionamento ótimo do sistema. Por se tratar de metodologias que se utiliza de dados numa base horária, ou seja trabalha com um grande volume de dados, normalmente se utiliza de ferramentas computacionais baseadas nesta metodologia para simular o sistema.

## **9. Modelo LOPS para dimensionamento de sistema fotovoltaico com bateria**

A maioria dos métodos de análise e projetos de sistemas autônomos com armazenamento de energia é baseada no conceito de potência suprida durante um número de dias autônomos – NAD. O valor de NAD refere-se ao número de dias consecutivos em que o sistema gerador não tem capacidade de suprir a demanda (dias sem sol). A capacidade do sistema de armazenamento é, portanto baseada na energia requerida durante estes dias consecutivos.

A potência instalada é muitas vezes determinada, levando-se em conta que mesmo durante os dias de menor radiação solar o sistema gerador terá capacidade suficiente para suprir a demanda. Portanto, a probabilidade de ocorrer perda no suprimento de energia tende a zero.

A principal desvantagem deste método é ser anti-econômico. A determinação da capacidade instalada do sistema gerador e principalmente das baterias, embora assegure a confiabilidade requerida, não é ótima.

Neste método, não há uma relação direta entre a capacidade de potência do sistema gerador e o sistema de armazenamento. O método apresentado nesta seção determina o dimensionamento ótimo do sistema (gerador + baterias) conjuntamente com a confiabilidade que se deseja para o mesmo.

A confiabilidade do sistema é medido através do “ *Índice de duração da perda de carga* ” ( LOPS- Loss of Power Supply) dados em horas/ano. A normalização desse índice em função do número de total de horas no ano, conduz ao *Índice de probabilidade de perda de suprimento*”.

### 9.1 Definição do problema.

O problema está na determinação da capacidade do sistema gerador e sistema de armazenamento de energia de tal modo que o custo total do sistema seja mínimo. Se considerarmos o custo de operação e manutenção desprezível, então a minimização passa a ser minimização do custo de investimento. A função custo mínimo é definida, portanto como:

$$F = \alpha P_R + \beta W_B$$

onde:

F – custo inicial da instalação (US\$)

$\alpha$  - custo unitário da potência instalada do sistema exceto baterias (US\$/kW)

$P_R$  – potência instalada (kW)

$W_B$  – capacidade do sistema de armazenamento (kWh)

$\beta$  - custo unitário do sistema de armazenamento (kWh)

### 9.2 Índice de perda de suprimento

O dimensionamento ótimo do sistema que leva a um custo mínimo de instalação é determinado de acordo com um certo grau de confiabilidade que se deseja para o sistema, ou seja, o índice de perda de suprimento (LOPS).

A variável chave que determina o índice de perda de suprimento é o estado da carga do sistema de armazenamento que é função da saída de potência do sistema gerador, da demanda e do estado anterior do sistema de armazenamento.

O estado da carga em um determinado tempo “t” para uma função discreta é dado por:

$$C(t) = C(t_0) + \frac{1}{W_B} \sum_{t=t_0}^t (P_G(t) - D_E(t)) \Delta t$$

onde:

$C(t)$  – carga do sistema de armazenamento no instante  $t$

$C(t_0)$  – carga inicial no instante  $t_0$

$W_B$  – capacidade do sistema de armazenamento

$P_G$  – potência gerada no sistema gerador no instante  $t$

$D_E$  – demanda de carga no instante  $t$

$t_0$  – hora em que o sistema inicia a operação.

Com a passagem do tempo, como o sistema de armazenamento interage com o sistema gerador e carga, a quantidade de energia armazenada muda. O sistema combinado não pode suprir a carga se a quantidade de energia armazenada nas baterias cair abaixo de um certo valor mínimo baseado em considerações de segurança. A somatória das horas no período de 1 (um) ano em que a carga da bateria cair abaixo do valor mínimo permitido, conduz ao Índice de Perda de Suprimento (LOPS).

### 9.3 A solução do problema

O método de solução que orientou a execução do programa de simulação, leva em conta os valores horários de radiação solar e demanda para todos os dias num período de um ano, os quais são usados para determinação da carga do sistema de armazenamento a cada hora e conseqüentemente do LOPS.

É pertinente lembrar novamente, que caso não esteja disponível valores horários de radiação solar para o período de um ano, existem modelos que partindo da radiação solar diária média mensal, determinam a radiação solar horária para todos os dias do ano.

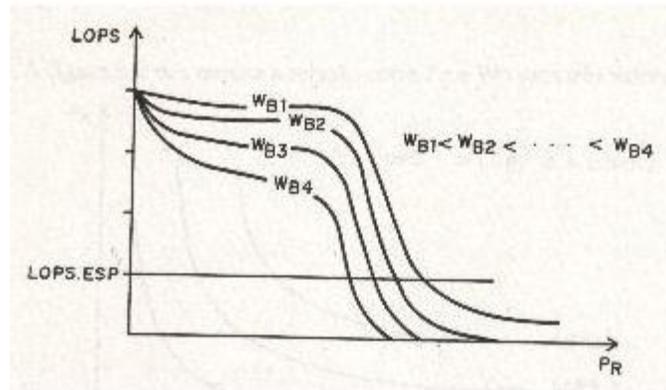
A determinação do LOPS e do custo de instalação pode ser feita para várias alternativas incluindo todos os possíveis valores de combinações de potência dos painéis ( $P_R$ ) e capacidade do sistema de armazenamento ( $W_B$ ), dentro do seguinte intervalo.

$$W_{Bmin} \leq W_B \leq W_{Bmax}$$

$$P_{Rmin} \leq P_R \leq P_{Rmax}$$

O número de combinações é finito assim como as variáveis  $P_R$  e  $W_B$  não são contínuas e mudam para valores discretos bem definidos. A mudança de  $P_R$  significa adicionar mais painéis solares, sistemas de inversão do sinal se utilizados. Numa maneira similar, a mudança de  $W_B$  significa adicionar mais baterias.

Estudando as várias alternativas, determinam-se as curvas que mostram LOPS como função da potência instalada e capacidade de armazenamento (figura 33)



**Figura 33 – LOPS função de  $P_R$  e  $W_B$**

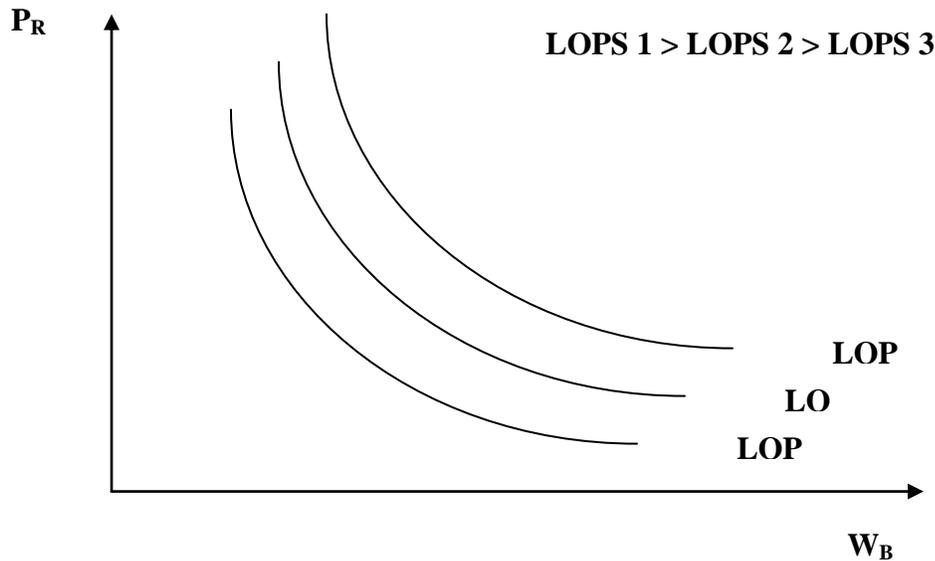
Verifica-se através da figura 33 que o valor de LOPS pode-se aproximar de zero. Isto significa que a energia requerida pelo consumidor está assegurada por todo o ano não havendo, portanto interrupção. Isto é conseguido instalando painéis e baterias com capacidade suficiente para não haver interrupção no fornecimento de energia. Analisando a figura 33 verifica-se que há diversas alternativas de  $P_R$  e  $W_B$  que levam a um LOPS especificado.

Qual a solução ótima?

#### **9.4 Escolha da solução ótima**

Analisando as várias alternativas observa-se que, o mesmo valor de LOPS pode ser obtido para várias combinações de  $P_R$  e  $W_B$ . Também podemos observar que para um dado LOPS, quanto maior o valor de  $P_R$  menor o valor de  $W_B$ . De posse dos vários valores de  $P_R$  e  $W_B$  podemos encontrar a função que descreve este fenômeno.

A figura 34 nos mostra a relação entre  $P_R$  e  $W_B$  para três valores de LOPS.



**Figura 34 - A relação entre  $P_R$  e  $W_B$  função de LOPS**

Queremos determinar qual o valor de  $P_R$  e  $W_B$  que minimizará a função custo  $F$ . A função custo pode ser representada no plano  $P_R$  e  $W_B$  mostrado na figura 35 por uma reta cuja inclinação é dada por  $-\frac{\beta}{\alpha}$ . Esta linha intercepta o eixo  $P_R$  no ponto dado por  $\frac{F}{\alpha}$  e eixo  $W_B$  no ponto dado por  $\frac{F}{\beta}$ .

Para valores dados de custos unitários  $\alpha$  e  $\beta$ , existem diversas linhas de custos cuja inclinação é igual a  $-\frac{\beta}{\alpha}$ . A intersecção de qualquer linha de custo, digamos  $F_2$ , e uma certa curva de LOPS, digamos  $LOPS_2$ , determina dois pares de  $P_R$  e  $W_B$  que fornecem o mesmo custo. Os pontos de intersecção neste caso são “b” e “c” como mostrado na figura 35

Embora estes dois pontos tenham um mesmo valor de LOPS ( $LOPS_2$ ) e o mesmo custo ( $F_2$ ), para o ponto de custo mínimo, devemos procurar a reta de custo com a mesma inclinação, tendo um ponto de tangência na curva  $LOPS_2$ . Neste caso,  $F_1$ , é a reta de custo mínimo e “a” é o ponto de tangência. A condição para obter a solução ótima é portanto:

$$\frac{dP_R}{dW_b} = \frac{-\beta}{\alpha}$$

para LOPS = LOPS<sub>2</sub>

Isto significa que a inclinação da reta é igual aquela da curva no ponto “a”. O LOPS especificado (no caso LOPS<sub>2</sub>), é escolhido de acordo com o grau de confiabilidade que se deseja para o sistema. A solução do modelo de otimização conduz as seguintes variáveis de decisão.

- 1- A capacidade instalada de potência dos painéis P<sub>R1</sub>
- 2- A capacidade instalada do sistema de armazenamento W<sub>B1</sub>
- 3- A custo mínimo da instalação F<sub>1</sub>

Podemos acrescentar às três variáveis citadas acima, outras duas variáveis de decisão muito importante para a comparação de fontes renováveis que é o déficit de energia ou energia não suprida e a energia não aproveitada ou energia perdida. O déficit de energia pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\text{Déficit} = \sum (D_E(t) - P_G(t))\Delta, \text{ quando } C(t) < C_{\min}$$

$$\text{A energia não aproveitada} = \sum (P_G(t) - D_E(t))\Delta, \text{ quando } C(t) > C_{\max}$$

Onde:

C(t) – carga instantânea da bateria

C<sub>min</sub> – valor mínimo admissível de carga para a bateria

C<sub>max</sub> – valor máximo admissível da carga para a bateria

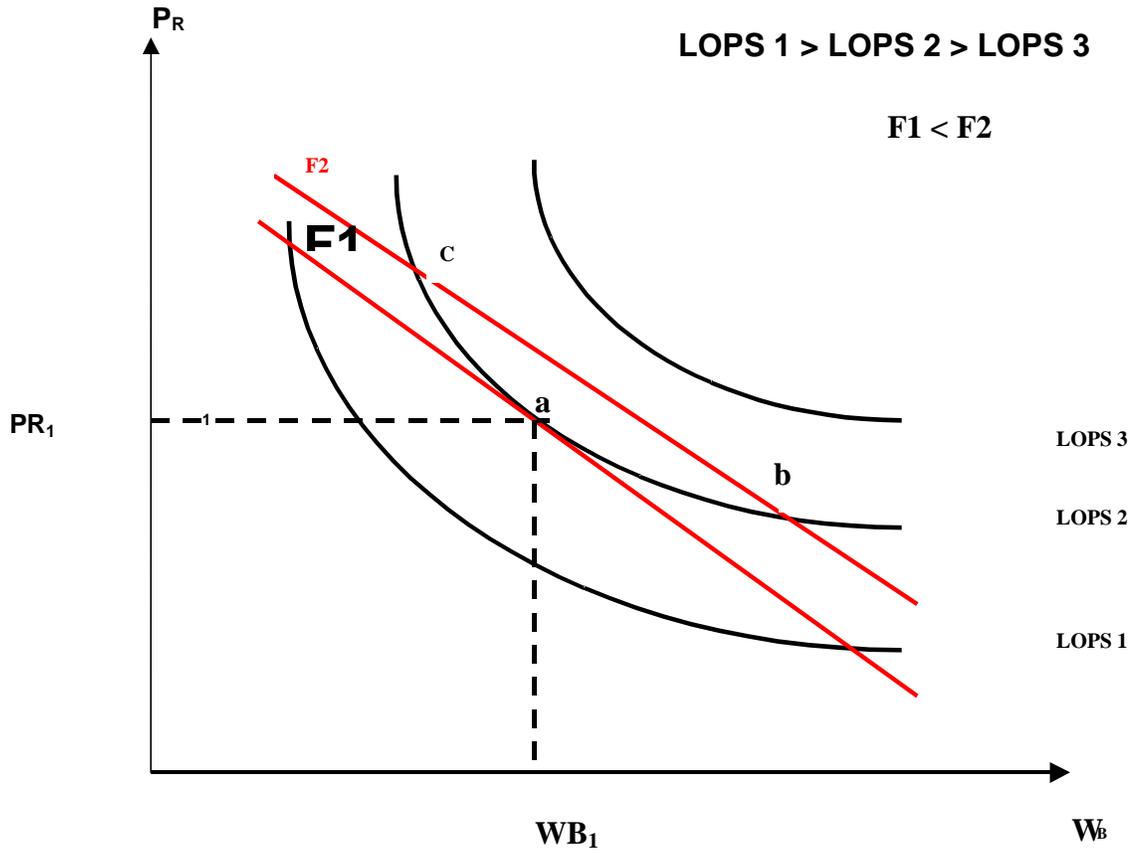


Figura 35 --- Solução gráfica para determinação da solução ótima.

**10. Exemplo de planilha de projeto**

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS**

**PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO: Método simplificado**

Defina tipo e quantidades de cargas a serem atendidas e se as mesmas irão funcionar em tensão CA ou CC. A partir destes dados dimensione o sistema para atender as cargas.

**Aplicação**

.....

Localização: ..... latitude: .....

**A: Cargas**

A1	Eficiência do inversor	
A2	Voltagem na entrada do sistema de armazenamento	volts
A3	Voltagem AC do inversor	volts

Eletrodomésticos	A4 Potência nominal Watts	A5 Fator de ajuste 1.0 para DC A1 para AC	A6 Potência ajustada (A4 / A5)	A7 Horas diárias de uso	A8 Energia diária consumida (A6 . A7 )

A9	Energia total demandada por dia ( soma de A8)	Watts -hora
A10	Total de Ah demandada por dia ( A9 / A2 )	Amper - hora
	Potência AC máxima demandada ( soma de A4)	Watts
	Potência CC máxima demandada ( soma de A6)	Watts

Ângulo de inclinação: ..... Mês de projeto: .....

C0 - Radiação solar incidente no plano horizontal - kWh / m2											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ

**B. Dimensionamento da bateria**

Temperatura de projeto: .....

B1 Dias de armazenamento requerido ( autonomia )	dias
B2 Limite de profundidade de descarga permitida ( decimal )	
B3 Capacidade requerida da bateria ( $A10 \cdot B1 / B2$ )	Ah
B4 Ah de capacidade da bateria selecionada	Ah
B5 Número de baterias em paralelo ( $B3 / B4$ )	
B6 Número de baterias em série ( $A2 /$ Voltagem da bateria )	
B7 Número total de baterias ( $B5 \cdot B6$ )	
B8 Capacidade total em Ah da bateria ( $B5 \cdot B4$ )	Ah
B9 Total de capacidade em kWh da bateria ( $B8 \cdot A2 / 1000$ )	kWh
B10 Profundidade de descarga diária média ( $0,75 \cdot A10 / B8$ )	

**C. Dimensionamento da geração fotovoltaica**

Ângulo de inclinação: ..... Mês de projeto: .....

C0 - Radiação solar incidente no plano horizontal - kWh / m <sup>2</sup>											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ

C1 Total de energia demandada por dia ( A9 )	Watt-hora
C2 Eficiência da bateria (decimal)	
C3 Energia diária requerida do painel ( $C1 / C2$ )	Watt-horas
C4 Voltagem de potência máxima do módulo selecionado à STC . 0,85	volts
C5 Potência garantida do módulo selecionado em STC	watts
C6 Horas de sol pleno na inclinação e mês desejado ( $C0 / 1kW/m^2$ )	horas
C7 Energia gerada por módulo por dia ( $C5 \cdot C6$ )	Watts - horas
C8 Energia gerada na temperatura de operação. Use fator de 0,8 para climas quentes e aplicações críticas; fator = 0,9 para climas moderados e aplicações não críticas ( fator . C7 )	Watts - horas
C9 Número de módulos requerido para atender o requisito de energia ( $C3 / C8$ )	módulos
C10 Número de módulos requeridos por ramo ( $A2 / C4$ )	módulos
C11 Número de ramos em paralelo ( $C9 / C10$ )	ramos
C12 Número de módulos a ser comprado ( $C10 \cdot C11$ )	módulos
C13 Potência nominal do módulo	watts
C14 Potência nominal do painel (conjunto de módulos) ( $C13 \cdot C12$ )	watts

OBS:

**1- O projeto pode utilizar o seguinte critério de dimensionamento a escolha do projetista.**

**Valores típicos de radiação solar.**

- Dimensionar para a pior situação : utilizando o mês de menor incidência de radiação solar. Com isto fica garantido o atendimento da carga com o nível de confiabilidade elevado. Neste caso haverá meses em que o sistema estará sobredimensionado . Neste caso a confiabilidade é elevada e o custo também.
- Em função do funcionamento das cargas : Por exemplo há cargas que são mais utilizadas nos meses de verão ou em um determinado mês. Assim sendo otimiza-se a geração para atender 100% da carga nos meses considerados.

**Valores médios**

- Também poderá se utilizar uma radiação média ( média dos meses). Neste caso, haverá meses de sobredimensionamento e sub-dimensionamento e neste último a bateria deverá complementar a geração solar.

Enfim, o projeto de um sistema fotovoltaico é o casamento entre a energia fornecida pelo sol e a demanda. O critério para dimensionamento pode ser: Custo da energia, confiabilidade, eficiência ou uma combinação destes fatores.

É possível (utilizando dados em bases horárias) realizar o dimensionamento ótimo do conjunto (bateria e painel), maximizando a confiabilidade e reduzindo os custos. O método utilizado no dimensionamento é mais complexo. Existem ferramentas computacionais que utilizam estes métodos e são usadas para dimensionar sistemas de médio e grande porte.

**11- Aspectos de custos**

Assim como qualquer outra fonte de eletricidade, o custo da energia gerada por células fotovoltaicas consiste essencialmente dos custos de capital e operação e manutenção.

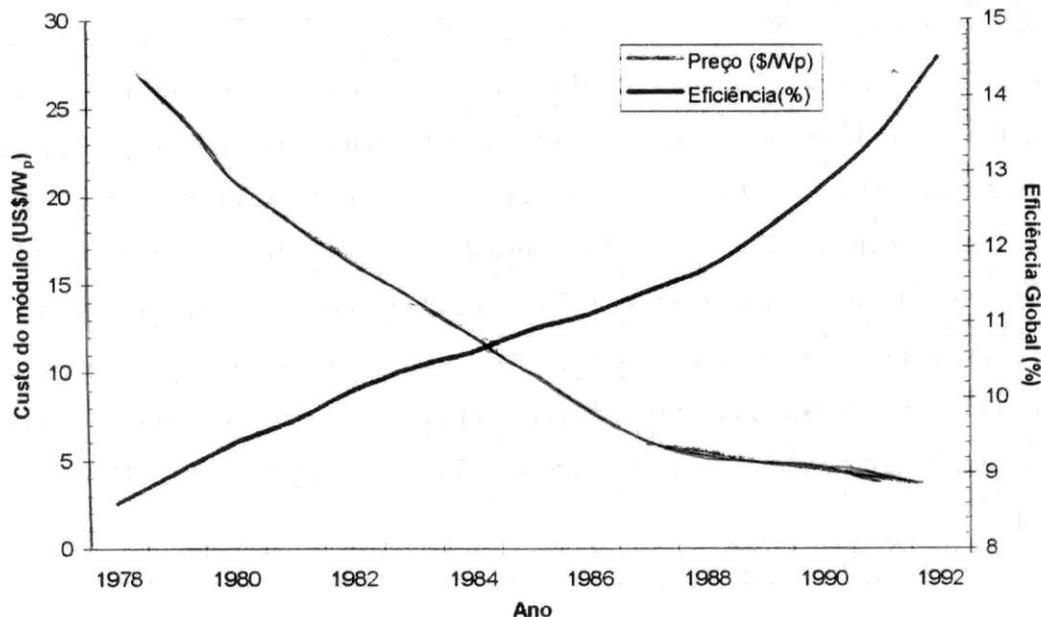
O custo de capital inclui o custo de aquisição do módulo, interconexão dos módulos em forma de painel ou arranjo, estrutura de sustentação, terra e fundações (para módulos instalados nos solo), custo do cabeamento, reguladores de carga, dispositivos de chaveamento e inversores, baterias ou conexão à rede elétrica.

Embora o custo de capital ainda esteja relativamente alto, comparado a outras alternativas convencionais, o custo de operação e manutenção é baixo, visto que tal sistema não possui partes móveis. Todavia, os módulos requerem uma limpeza periódica devido à acumulação de sujeira, particularmente quando instalados nas áreas urbanas.

Ventos fortes podem distorcer as estruturas de sustentação e a água da chuva pode causar corrosão nas partes metálicas. Além disso, a expansão e contração do painel, provocados pelas variações na temperatura ambiente, podem causar rachaduras, curto-circuitos e desconexões. Todos estes problemas podem ser resolvidos ou minimizados, com uma atenção especial à especificação do material e detalhamento do projeto.

Sistemas que utilizem baterias, requerem manutenção adicional devido a necessidade de checagem periódica dos terminais das mesmas (devido ao processo de corrosão) e de trocas da água destilada.

Embora o custo de um sistema fotovoltaico ainda esteja elevado, ele vem decrescendo ao longo dos últimos anos. Os avanços tecnológicos que promovem um aumento na eficiência de conversão energética e as melhorias nos métodos de produção industriais são os grandes responsáveis pela diminuição nos preços dos módulos fotovoltaicos. A figura 36 mostra a evolução dos preços e da eficiência dos módulos fotovoltaicos desde 1978 até 1992.



**Figura 36 – Evolução dos preços e na eficiência dos módulos**

Embora o preço de um módulo fotovoltaico utilizado em sistemas de grande porte (MW) esteja hoje numa faixa de US\$5 /Wp, os sistemas de pequeno porte apresentam custos bastante superiores (por volta de 12 US\$/Wp), por não se beneficiarem da economia de escala na compra, instalação e aquisição dos equipamentos auxiliares (condicionamento de potência) . Em pequenas instalações, o custo dos equipamentos do sistema de condicionamento da potência se iguala ao preço do módulo.

Sistemas conectados à rede de distribuição de energia elétrica, normalmente de grande porte, como a planta de 500 kW instalada em Moint Soleil em Switzerland, possui custos em torno de 11 US\$/Wp. Neste custo estão incluídos os preços do módulo,

estrutura de sustentação, sistema de condicionamento da potência e equipamentos necessários para se fazer a conexão à rede.

O custo de geração da energia elétrica, depende além dos custos de instalação, da quantidade de radiação incidente no local, eficiência do sistema, fator de disponibilidade (quantidade de horas no ano em que o sistema estará disponível), taxa de desconto, período de amortização e custo de operação e manutenção (O&M). O custo de O&M, não é de fácil obtenção, porém, as indústrias estimam em torno de 1% do custo de capital. No atual estado da arte da tecnologia fotovoltaica e, considerando os parâmetros relacionados acima, o custo médio da energia gerada hoje, situa-se em torno de 200 a 400 US\$/MWh.

Mesmo com os preços praticados atualmente, a tecnologia fotovoltaica já se mostra competitiva em algumas aplicações específicas como a iluminação de residências de baixo consumo em localidades remotas, bombeamento d'água em locais isolados, torres de repetição de sinais, entre outros.

Se os preços diminuïrem significativamente, por volta de uns 50% em relação aos preços atuais, a tecnologia fotovoltaica será capaz de competir economicamente com as fontes convencionais em várias aplicações. A queda nos preços dependerá não apenas da evolução tecnológica, com também no aumento do mercado que poderá ser conseguido através de incentivos governamentais e esclarecimento do consumidor quanto ao funcionamento e benefícios da tecnologia.

**Viabilidade técnico-econômica:**

Estudo de viabilidade técnico-econômica de atendimento de uma comunidade isolada através de três alternativas:

- Módulos fotovoltaicos
- Grupo-gerador diesel
- Extensão da rede elétrica

**Localização:** -----

**Latitude:** 10º

DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR NO PLANO HORIZONTAL – kWh/m <sup>2</sup>											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
4,161	4,000	4,129	4,133	5,065	5,300	5,935	6,194	5,567	5,710	5,333	4,839
Média	5,030										

Distância da rede: 30 km

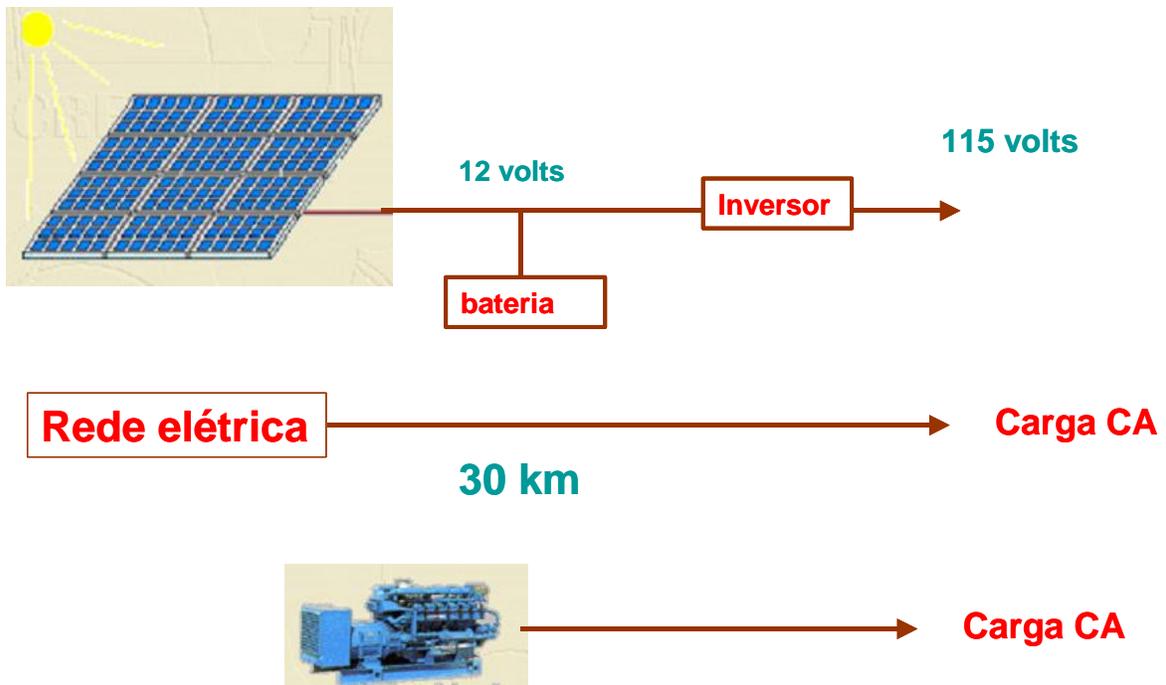
Tarifa de energia =0,31 R\$/kWh

Total de residências: 12

**CONSUMO DE ENERGIA : 01 residência**

<b>Aparelho</b>	<b>Qtde</b>	<b>P(W)</b>	<b>Horas/dia</b>	<b>Dias/seman</b>	<b>Consumo (Wh/dia)</b>
Televisor	1	50	3	7	150
Rádio	1	15	2	4	17,14
Geladeira	1	80	10	7	800
Ventilador	1	100	4	7	400
Lâmpadas	4	15	4	7	240
<b>Consumo total=</b>					<b>1607,14</b>

**Configuração dos sistemas para atendimento da carga:**



## Especificação dos componentes:

<b>Módulos fotovoltaicos</b>	
Fabricante	KYOCERA
Modelo	KC80
Configuração	12
Potência nominal (Wp)	80
Corrente nominal (V)	4.73
Tensão Nominal (V)	16.9
Corrente de curto-circuito (A)	4.97
Tensão de circuito aberto (V)	21.5
Vida útil (anos)	30
Preço (R\$)	1.400,00

<b>Baterias</b>	
Fabricante	Moura
Modelo	46BP
Tipo	Automotiva
Capacidade (Ah)	150
Tensão Nominal (V)	12
Energia fornecida (kWh)	1.80
Profundidade de descarga máxima (%)	50
Eficiência(%)	85
Vida útil (anos)	5
Preço (R\$)	280

<b>Inversores de tensão</b>	
Fabricante	STATPOWER
Modelo	Prowatt 1000
Potência nominal (kW)	1
Capacidade de surto (kW)	2
Forma de onda	Senoidal modificada
Tensão de entrada (V)	12
Tensão de saída (V)	115
Eficiência (%)	85
Vida útil (anos)	10
Preço (R\$)	1800

<b>Controlador de carga</b>	
Fabricante	Morningstar
Modelo	Prostar 30
Capacidade (A)	30
Tensão nominal (V)	24/12
Set-Points ajustáveis	Sim
Vida útil (anos)	15
Preço(R\$)	700

<b>Rede elétrica</b>	
Distância (km)	30
Custo (R\$/km)	12000

<b>Gerador diesel</b>	
Potência (kVA)	1
Fator de potência (%)	0,85
Potência ativa (kW)	0,85
Vida útil (anos)	10
Preço (R\$)	2800

## Dimensionamento do arranjo fotovoltaico

### A – Geração (módulo)

A1 – Para sistema isolado; radiação solar (pior caso) : 4 kWh/m<sup>2</sup>

A.2 – Inclinação: 10° - R<sub>Si</sub> = 4 . cos 10° = 3,94 kWh/m<sup>2</sup>

A.3 - N° de dias de sol pleno = 3,94 kWh/m<sup>2</sup> / 1kW/m<sup>2</sup> = 3,94 horas

A.4 – Demanda diária = 1607,14 = 1,61 kWh/dia

A.5 – Eficiência da bateria = 0,85

A.6 – Eficiência do inversor = 0,85

A.7 – Energia requerida do painel: A4 / (A5 . A6) = 2224,41 Wh

A.8 – Voltagem de potência máxima á STC . 0,85 = 14,36 volts

A.9 – Potência nominal garantida à STC\* = 80 Wp

A10 – Energia gerada pelo módulo: A9 . A3 = 80Wp . 3,94 = 315,2 Wh/dia

A11 – N. de módulos necessários: A7/A10 = 8 módulos

A12 – N. de módulos em série: Voltagem do sistema / A8 = 1

A13 - N. de módulos em paralelo : A11 / A12 = 8

A14 – n. de módulos a ser comprado: A12 . A13 = 8

A15 – Potência do arranjo : A9 . A14 = 640 Wp

- STC – condição padrão de teste: radiação = 1000 W/m<sup>2</sup>; temperatura da célula = 25°C; massa de ar = 1.5

## **B – Dimensionamento do banco de baterias**

**B1** – Autonomia das baterias = 1,5 dias

**B2** – Profundidade máxima de descarga = 0,50

**B3** – Capacidade requerida da bateria:  $(A4 \cdot B1) / (B2 \cdot A6) = 5672,26 \text{ Wh/dia}$

**B4** – Wh da bateria selecionada =  $1800 \text{ Wh} / 12V_{cc} = 150 \text{ Ah}$

**B5** – N. de baterias em paralelo  $(B3/B4) = 4$

**B6** – N. de baterias em série =  $\text{Voltagem do sistema} / \text{Voltagem da bateria} = 1$

**B7** – N. total de baterias =  $B5 / B6 = 4$

**B8** – Capacidade total em Ah =  $B7 \cdot 150 = 600 \text{ Ah}$

**B9** – Capacidade em kWh =  $1,8 \cdot B7 = 7,2 \text{ kWh}$

## **C – Controlador de carga**

**C1** –  $I_{contr.} = 1,25 \times I_{sc} (\text{arranjo}) = 1,25 \times 4,97 \text{ (A)} \times 8 \text{ módulos} = 49,7 \text{ A}$

**C2** – Capacidade do controlador em amper = 30 A

**C3** – N. de controladores necessários =  $C1 / C2 = 2$

## **D – Inversor**

**D1** – tensão de entrada = 12 volts

**D2** – Tensão de saída = 115 volts

**D3** – Potência nominal = 1 kW

**D4** – N. de inversores :  $\sum c \arg a = 305 \text{ watts}$  , portanto

Será usado 1 inversor

Obs: 1- Dimensionamento do inversor está diretamente relacionado à carga – Sistemas isolados

2 – Dimensionamento do inversor diretamente relacionado à geração quando ligado á rede

## **E - Custo inicial dos componentes**

**E1** – Custo do arranjo =  $A14 \times \text{Preço do módulo} = \text{R\$ } 11.200,00$

**E2** – Custo de baterias =  $280,00 \text{ R\$} \times 4 (B7) = 1.120,00 \text{ \$}$

**E3** – Custo do controlador =  $700,00 \text{ R\$} \times 2 (C3) = 1.400,00 \text{ R\$}$

**E4** – Custo do inversor =  $1.800,00 \text{ R\$} \times 1 (D4) = 1.800,00 \text{ R\$}$

**E5** – Custo dos acessórios = 1.000,00 R\$

**E6** – Custo de projeto = 1.000,00 R\$

**E7** – Custos totais de investimento =  $(D1+D2+D3+D4+D5+D6) = 17.520,00 \text{ R\$}$

## **F - Grupo gerador diesel**

**F1** - Potência do grupo-gerador utilizado = 1 kVA

**F2** - Fator de potência = 0,85

**F3** - Potência ativa (kW) =  $E1 \times E2 = 0,85$

**F4** - Custo do combustível = 1,40 R\$/litro (obs: valor na bomba)

OBS: para o caso de sistemas isolados, há de se considerar o custo do transporte que dependendo da distância deve onerar substancialmente o custo do combustível

**F5** - Consumo diário de energia (A4) = 1607,14 Wh

**F6** - Consumo diário de combustível em litros =

**F5** = vazão (**F6**)  $\times$  PCI  $\times \eta$  (do grupo diesel)

1607,14 Wh = vazão  $\times$  10750 kcal/kg  $\times$  0,4

**F6 (vazão)** = 0,37 litros / dia

OBS: 1 kWh = 860 kcal

Massa específica do diesel = 852 kg/m<sup>3</sup>

PCI = poder calorífico do diesel = 10750 kcal/kg

## **G – Rede Elétrica**

**G1** - km de rede = 30

**G2** - Custo / km de rede

## **Dimensionamento econômico**

### **H – Sistema fotovoltaico ( VP)**

**H1** - tempo de análise - 30 anos

**H2** - taxa de desconto 12%

### **H3 \_ Cálculo do valor presente dos custos**

VP (E1) = 11.200,00 R\$

VP(E2) =  $1.120,00 \cdot \frac{1}{(1+0,12)^5} + 1.120,00 \cdot \frac{1}{(1+0,12)^{10}} + 1.120,00 \cdot \frac{1}{(1+0,12)^{15}}$   
 $+ 1.120,00 \cdot \frac{1}{(1+0,12)^{20}} + 1.120,00 \cdot \frac{1}{(1+0,12)^{25}} + 1.120,00 \cdot \frac{1}{(1+0,12)^0}$   
= 2.502,74 R\$

VP(E3) =  $1.400,00 \cdot \frac{1}{(1+0,12)^{15}} + 1.400,00 \cdot \frac{1}{(1+0,12)^0} = 1.655,77$  R\$

$$VP (E4) = 1.800,00. 1/(1+0,12)^{10} + 1.800,00. 1/(1+0,12)^{20} + 1.800,00. 1/(1+0,12)^0 = 2.566,15 \text{ R\$}$$

$$VP (E55) = 1.000,00 \text{ R\$} \quad VP (E56) = 1.000, 00 \text{ R\$}$$

$$H3 = VP (\text{total}) = 19.924,66 \text{ R\$}$$

#### **H4 -Cálculo do investimento anualizado (IA)**

$$VP(\text{total}) = IA . ((1+0,12)^{30}-1) / 0,12 (1+0,12)^{30}$$

$$\mathbf{H4 - IA = 2.473,38 \text{ R\$/ano.}}$$

#### **H5- – Cálculo dos custos anuais de operação e manutenção**

$$\mathbf{H5 = 1\% \times D7 = 175,20 \text{ R\$}}$$

#### **Custos anuais totais (CAT)**

$$H6 - (H4 + H5) = 2.648,58 \text{ R\$}$$

#### **Energia anual gerada**

$$\mathbf{H7 - EG(\text{anual}) = E_{\text{consumida}} (A4) \times 365 \text{ dias/ano} = 586,606 \text{ kWh / ano}}$$

#### **H8 Custo da energia anual gerada pelo sistema fotovoltaico**

$$\mathbf{H8 - CGE = H6/ H7 = 4,51 \text{ R\$ / kWh}}$$

#### **I – Custo do grupo gerador diesel**

$$\mathbf{I1 - Investimento inicial = 2.800, 00 \text{ R\$}}$$

$$\mathbf{I2 - Custos anuais de O\&M = 20\% \times I1 = 560,00 \text{ R\$}}$$

$$\mathbf{I3 - Gastos com combustível = F6 \times 365 \text{ dias / litro} \times Cc (1,4 \text{ R\$/litro}) = 189,07 \text{ R\$/ano}}$$

Onde Cc – custo do combustível

#### **I4 Valor presente do custo do grupo-gerador (VP)**

$$VP = 2.800,00 . 1/(1+0,12)^0 + 2.800,00 . 1/(1+0,12)^{10} + 2.800,00 . 1/(1+0,12)^{20} = 3.991,78 \text{ R\$}$$

#### **I5 – Investimento anualizado do grupo-gerador (IAG)**

$$VP = IAG \times ((1+0,12)^{30}-1)/0,12(1+0,12)^{30} = 495,526 \text{ R\$ / ano}$$

**I6 – Custos anuais totais**

$$I2+I3+I5 = 1.244,58 \text{ R\$}$$

**I7 – Energia anual gerada**

$$\text{EG anual} = \text{consumo (A4)} \times 365 \text{ dias/ano} \times \text{fator de disponibilidade (0,90)} = 527,945 \text{ kWh / ano}$$

**I8 – Custo anual da energia gerada (CGDanual)**

$$\text{CGDanual} = I6 / I7 = 2,35 \text{ R\$/kWh}$$

**J – Custo da extensão da rede elétrica**

**J1 – Distância = 30 km**

**J2 – Custo / km = 12.000,00 R\$**

$$\text{J3 – Custo totais} = J1 \times J2 = 360.000,00 \text{ R\$}$$

$$\text{J4 – Custo anualizado} = J3 \cdot ((1+0,12)^{30}-1) / 0,12 (1+0,12)^{30} = 44.689,22 \text{ R\$ / ano}$$

$$\text{J5 – Despesas anuais com energia elétrica} = A4 \times 365 \text{ dias/ano} \times 0,31 \text{ R\$/ kWh} = 181.84 \text{ R\$/ano}$$

**J6 - Custos anuais totais**

$$\text{J6} = (J4) / 12 \text{ casas} + J5 = 3.739,23 \text{ R\$ / residência}$$

$$\text{J7 – Custo do kWh (anual)} = J6 / A4 \times 365 \text{ dias/ano} = 6,38 \text{ R\$ / kWh}$$

## Exercícios

2 – Assuma que um volume de 7520 litros/ dia sejam necessários para irrigar uma certa área. Assuma também que o reservatório do qual a água será bombeada é grande, porém possui uma profundidade de 60,96 metros e que o pior dia de radiação solar é de 6 horas de sol pleno. Dimensione um sistema fotovoltaico que alimentará uma bomba que irá suprir esta quantidade de água.

Dados:

Rendimento da bomba = 25%  
Perda na tubulação = 5%

Solução:

Considerando as perdas na tubulação, a altura efetiva de bombeamento é:

$$H = 1,05 \times 60,96 \text{ metros} = 64 \text{ metros}$$

Obs 1 : Note que neste exemplo, a água está sendo distribuída no nível do terreno (solo ) sem armazenamento.

Potência da bomba:

$$P \text{ (kW)} = 9,81 \text{ HQ} / \text{rendimento da bomba}$$

H – metros  
 $Q = \text{m}^3/\text{seg}$

$$P \text{ (kW)} = 9,81 \times 64 \text{ metros} \times \text{vazão} \left( \left( \frac{7570 \text{ litros}}{1000 \text{ litros/m}^3} \right) / \left( \frac{3456 \text{ segundos}}{6 \text{ horas}} \right) \right) / \text{rendimento da bomba} = 0,880 \text{ kW}$$

Obs2: Bom lembrar que o motor estará disponibilizando a potência máxima (880 Watts) durante poucas horas próximas ao horário do meio-dia (horário em que a radiação solar incidente atinge o seu valor máximo). Após e antes desse período, a bomba estará recebendo menos energia do arranjo fotovoltaico e portanto irá operar numa potência menor que a máxima (880 Watts).

- Potência do arranjo fotovoltaico

Como o arranjo está conectado diretamente no motor da bomba, a sua potência é a mesma requerida pela bomba com sol pleno.

Assumindo o uso de um módulo de 50Wp, serão necessários  $880 / 50 = 17,6$  módulos e portanto devem ser adquiridos 18 módulos.

### Exercício proposto

- 1- Deseja-se encher um reservatório de água cuja capacidade é de 5000 litros e está a uma altura de 10 metros do solo. Dimensionar um sistema fotovoltaico para alimentar uma bomba que irá bombear a água de um reservatório inferior situado a uma profundidade de 80 metros do solo.

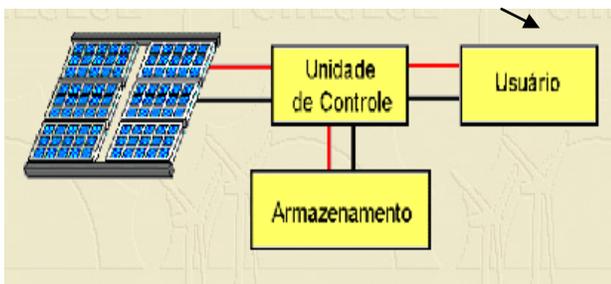
Dados:

Radiação solar diária incidente = 4 kWh/m<sup>2</sup>

Rendimento da bomba = 25%

Perdas hidráulicas = 6 %

- 2- Seja o sistema fotovoltaico apresentado abaixo;



#### Dados:

- área do painel = 4 m<sup>2</sup>
- Radiação solar incidente = 5,6 kWh / m<sup>2</sup> / dia
- Autonomia do sistema de armazen. = 3 dias
- Rendimento da bateria = 85 %
- Capacidade Ah da bateria = 40 Ah
- Voltagem da bateria = 6Volts
- Voltagem da carga = 12 volts
- Máxima profundidade de descarga = 0,8
- Rendimento do arranjo fotovoltaico = 12%

#### Pede-se:

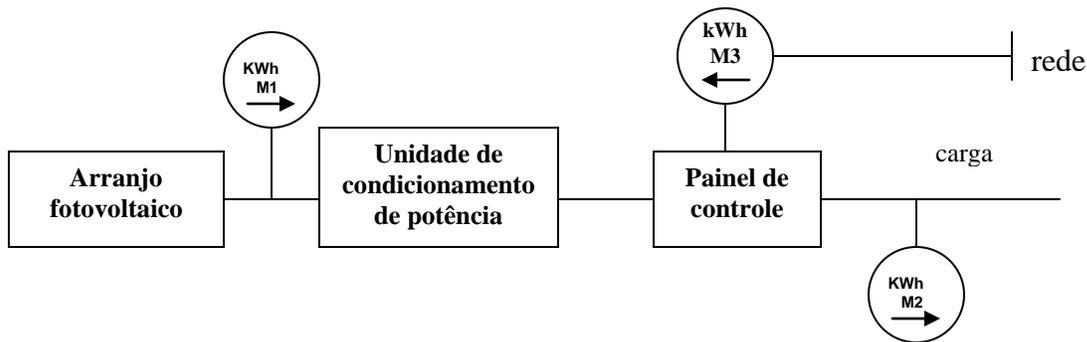
Determinar: Potência instalada (nominal) na saída do painel ; Demanda diária de energia (consumo); capacidade (Ah) total do sistema de armazenamento, quantidade de baterias a serem usadas; n<sup>o</sup> de baterias em série e n<sup>o</sup> de baterias em paralelo,

3- Considerando a configuração de sistema mostrado abaixo, dimensione a capacidade do arranjo fotovoltaico de modo que 60% do consumo diário seja suprido pelo arranjo e os outros 40% pela concessionária de energia elétrica.

**Dados:** Radiação solar incidente = 5,2 kWh/m<sup>2</sup>/dia ; Eficiência do arranjo = 12% ; eficiência do sistema de acondicionamento de energia = 90% ; consumo diário: Demanda máxima = 400 Watts , Fator de carga = 0,6.

Calcular;

- Potência instalada (watts)
- Área do arranjo fotovoltaico (m<sup>2</sup>)



### 13- IMPACTO AMBIENTAL

Sob o ponto de vista da operação de sistemas fotovoltaicos, é evidente que o impacto ambiental é muito menor do que os impactos causados por fontes convencionais, visto que o recurso utilizado na produção de energia é renovável, não emite poluentes líquidos e gasosos e nem material radiativo. O uso direto da energia solar é vantajoso porque o equilíbrio térmico da Terra praticamente não é perturbado. A emissividade de geradores solares (que faz com que a geração solar não convertida seja irradiada de volta como infravermelho), é um parâmetro aberto. A emissividade depende praticamente do material de encapsulação dos painéis ou de espelhos solares, usando diferentes espécies de plásticos, vidros e metais. Assim a emissividade poderia ser ajustada de modo que o equilíbrio local ou total permaneçam basicamente inalterados.

Desde que o sistema não tenha partes móveis, ele é seguro sob o ponto de vista mecânico e não emite ruído.

Quanto ao impacto visual, estes equipamentos naturalmente são vistos pelas vizinhanças independente se estão instalados no solo ou nos telhados das edificações e podem ser bem aceitos ou não, dependendo da exigência estética de cada indivíduo. Diversas empresas, incluindo Sanyo no Japão e BMC Solartechnik na Alemanha, têm produzido módulos fotovoltaicos na forma de telhas especiais que misturam-se com as estruturas dos telhados de forma menos intrusa dos que os módulos comumente utilizados.

O impacto ambiental que ocorre no processo de fabricação das células também não é tão significante, exceto no caso de um possível acidente na fabricação das mesmas. O

material básico do qual 99% das células são feitas, o silício, não é intrinsicamente nocivo. Todavia, como qualquer outro processo químico, alguns cuidados devem ser tomados, para assegurar que produtos utilizados no processo de fabricação não contaminem o ambiente local.

Finalmente, cuidados devem ser tomados também ao final da vida útil dos módulos na etapa de deposição ou reciclagem, especialmente no caso de módulos contendo pequenas partículas de metais tóxicos, a fim de que essas substâncias não sejam liberadas para o meio ambiente.

## **Bibliografia**

- [1] MESSENGER,R.; VENTRE,J. Photovoltaic Systems Engineering. CRC Press. Boca Raton London New York Washington, D.C,2000, 385p.
- [2] Grupo de Trabalho de Energia Solar fotovoltaica – GTEF. Sistemas fotovoltaicos. Manual de Engenharia. 1 ed., junho de 1995.
- [3] Fraidenraich, N.; Lyra,F. Energia Solar. Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermoeétrica e Fotovoltaica. Ed. Universitária da UFPE.1995, 471p.
- [4] Fadigas, E.AF.A Dimensionamento de fontes fotovoltaicas e eólicas com base no índice de perda de suprimento e sua aplicação para atendimento à localidades isoladas. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993, 162p.