

Curso de energia solar fotovoltaica, a electricidade que vem do sol

I- Introdução

II- Composição física e fabricação dos dispositivos fotovoltaicos

III- Conceitos eléctricos

IV- Curvas características das células fotovoltaicas

V- Configuração de sistemas de produção fotovoltaicos

VI- Dimensionamento de sistemas de produção fotovoltaicos e de bancos de baterias

VII- Conexões e dimensionamento de condutores e cabos

VIII- Instalação e manutenção

I- Introdução

Um sistema de produção electro-solar é uma fonte de energia que, através da utilização de células fotovoltaicas, converte directamente a energia luminosa em electricidade.

Vantagens fundamentais:

- Não consome combustível
- Não produz poluição nem contaminação ambiental
- É silencioso
- Tem uma vida útil superior a 20 anos
- É resistente a condições climáticas extremas (granizo, vento, temperatura e humidade)
- Não tem peças móveis e, portanto, exige pouca manutenção (só a limpeza do painel)
- Permite aumentar a potência instalada por meio da incorporação de módulos adicionais

Principais aplicações:

Geralmente é utilizado em zonas afastadas da rede de distribuição eléctrica, podendo trabalhar de forma independente ou combinada com sistemas de produção eléctrica convencional. Suas principais aplicações são:

- Electrificação de imóveis rurais: luz, TV, rádio, comunicações, bombas de água

- Electrificação de cercas
- Iluminação exterior
- Sinalização
- Protecção catódica
- Barcos, roulotes

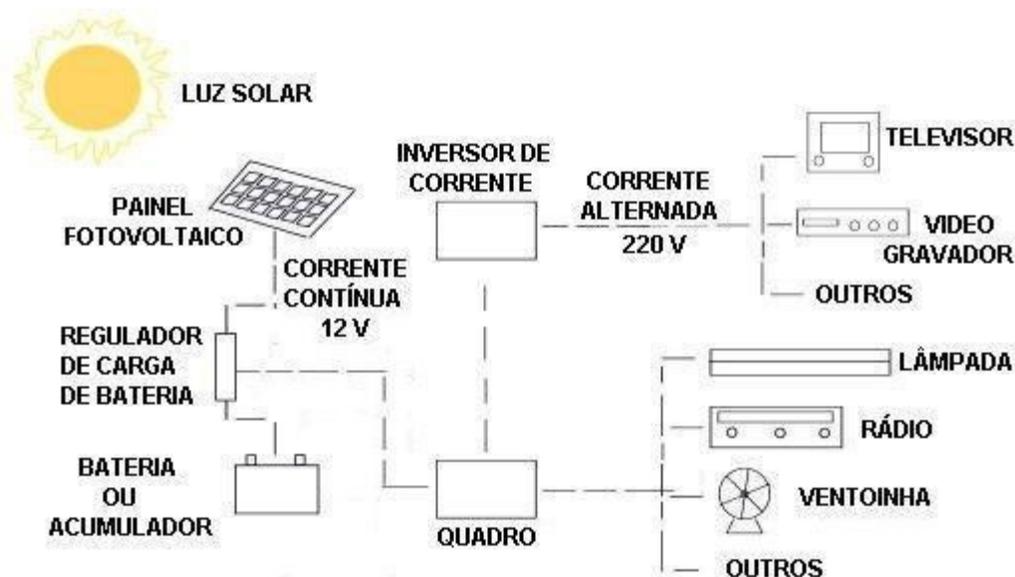
Componentes do sistema:

Corrente contínua 12V:

- Painéis ou módulos de células fotovoltaicas
- Suportes para os painéis
- Regulador de carga de baterias e banco de baterias

Corrente alternada 110/220V:

Além dos elementos anteriores, entre as baterias e o consumo será necessário instalar um **inversor de corrente** com a potência adequada. O inversor converte a corrente contínua (DC) das baterias em corrente alternada (AC). A maioria dos electrodomésticos utiliza a corrente alternada.



ESQUEMA (Fig.1)

Este curso foi publicado originalmente por [Panorama Energético](#) .
Traduzido, adaptado e reproduzido pela AMERLIS com autorização dos autores.

A Retscreen, do Canadá, produziu um software para elaborar projectos de fotovoltaico. Se quiser este software [CLIQUE AQUI](#) para efectuar o descarregamento (1721 k bytes).
É gratuito.

Se preferir o software em francês vá directamente ao sítio web da [Retscreen](#) .

Actualizado em 05/Jun/01

II- Composição física e fabricação dos dispositivos fotovoltaicos

Efeito fotovoltaico:

Os módulos são compostos de células solares de silício. Elas são semicondutoras de electricidade porque o silício é um material com características intermédias entre um condutor e um isolante.

O silício apresenta-se normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui electrões livres e portanto é um mau condutor eléctrico. Para alterar isto acrescentam-se percentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. Mediante a dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com electrões livres ou material com portadores de carga negativa (silício tipo N). Realizando o mesmo processo, mas acrescentando Boro ao invés de fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, défice de electrões ou material com cargas positivas livres (silício tipo P).

Cada célula solar compõe-se de uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P (ver Figura 2).

Separadamente, ambas as capas são electricamente neutras. Mas ao serem unidas, exactamente na união P-N, gera-se um campo eléctrico devido aos electrões do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P.

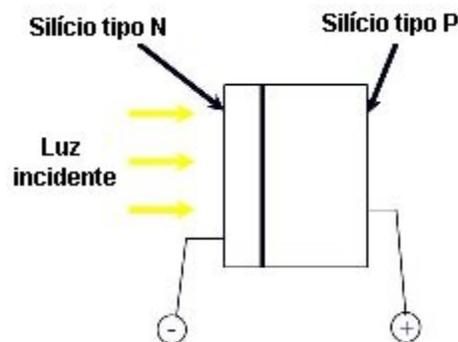


Figura 2

Ao incidir a luz sobre a célula fotovoltaica, os fotões que a integram chocam-se com os electrões da estrutura do silício dando-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo eléctrico gerado na união P-N, os electrões são orientados e fluem da camada "P" para a camada "N".

Por meio de um condutor externo, conecta-se a camada negativa à positiva. Gera-se assim um fluxo de electrões (corrente eléctrica) na conexão. Enquanto a luz continue a incidir na célula, o fluxo de electrões manter-se-á.

A intensidade da corrente gerada variará proporcionalmente conforme a intensidade da luz incidente.

Cada módulo fotovoltaico é formado por uma determinada quantidade de células conectadas em série. Como se viu anteriormente, ao unir-se a camada negativa de uma célula com a positiva da seguinte, os electrões fluem através dos condutores de uma célula para a outra. Este fluxo repete-se até chegar à última célula do módulo, da qual fluem para o acumulador ou a bateria.

Cada electrão que abandona o módulo é substituído por outro que regressa do acumulador ou da bateria. O cabo da interconexão entre módulo e bateria contém o fluxo, de modo que quando um electrão abandona a última célula do módulo e encaminha-se para a bateria outro electrão entra na primeira célula a partir da bateria.

É por isso que se considera inesgotável um dispositivo fotovoltaico. Produz energia eléctrica em resposta à energia luminosa que entra no mesmo.

Deve-se esclarecer que uma célula fotovoltaica não pode armazenar energia eléctrica.

Tipos de células:

Existem três tipos de células, conforme o método de fabricação.

- **Silício monocristalino:** Estas células obtêm-se a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais. As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas quadradas finas (0,4-0,5 mm de espessura). A sua eficiência na conversão de luz solar em electricidade é superior a 12%.
- **Silício policristalino:** Estas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de bocados de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício arrefece lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Sua eficiência na conversão de luz solar em electricidade é ligeiramente menor do que nas de silício monocristalino.
- **Silício amorfo:** Estas células são obtidas por meio da deposição de camadas muito finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em electricidade varia entre 5% e 7%.

Fabricação dos módulos fotovoltaicos:

O módulo fotovoltaico é composto por células individuais conectadas em série. Este tipo de conexão permite adicionar tensões. A tensão nominal do módulo será igual ao produto do número de células que o compõem pela tensão de cada célula (aprox. 0,5 volts). Geralmente produzem-se módulos formados por 30, 32, 33 e 36 células em série, conforme a aplicação requerida.

Procura-se dar ao módulo rigidez na sua estrutura, isolamento eléctrico e resistência aos factores climáticos. Por isso, as células conectadas em série são encapsuladas num plástico elástico (Etilvinilacetato) que faz também o papel de isolante eléctrico, um vidro temperado com baixo conteúdo de ferro, na face voltada para o sol, e uma lamina plástica multicamada (Poliéster) na face posterior. Em alguns casos o vidro é substituído por uma lamina de material plástico transparente.

O módulo tem uma moldura composta de alumínio ou poliuretano e caixas de conexões às quais chegam os terminais positivo e negativo da série de células. Nos bornes das caixas conectam-se os cabos que ligam o módulo ao sistema.

Etapas do processo de fabricação do módulo:

- Ensaio eléctrico e classificação das células
- Interconexão eléctrica das células
- Montagem do conjunto. Colocação das células soldadas entre camadas de plástico encapsulante e laminas de vidro e plástico
- Laminação do módulo. O conjunto é processado numa máquina semi-automática a alto vácuo que, por um processo de aquecimento e pressão mecânica, conforma o laminado.
- Curagem. O laminado processa-se num forno com temperatura controlada no qual completa-se a polimerização do plástico encapsulante e alcança-se a adesão perfeita dos diferentes componentes. O conjunto, depois da curagem, constitui uma única peça.
- Emolduração. Coloca-se primeiramente um selante elástico em todo o perímetro do laminado e a seguir os perfis de alumínio que formam a moldura. Usam-se máquinas pneumáticas para conseguir a pressão adequada. As molduras de poliuretano são colocadas por meio de máquinas de injeção.
- Colocação de terminais, bornes, díodos e caixas de conexões
- Ensaio final

Ensaio dos módulos

Sobre os módulos deve medir-se e observar-se:

- Características eléctricas operacionais
- Isolamento eléctrico (a 3000 Volt de C.C.)
- Aspectos físicos, defeitos de acabamento, etc
- Resistência ao impacto
- Resistência à tracção das conexões

- Resistência à nevoa salina e à humidade ambiente
- Comportamento a temperatura elevadas por períodos prolongados (100 graus Celsius durante 20 dias)
- Estabilidade às mudanças térmicas (de -40° C a +90° C) em ciclos sucessivos



[↑ Topo da página](#)

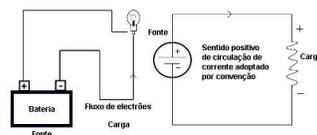
Montado em 06/Abr/01

III- Conceitos eléctricos

Tensão e corrente:

A electricidade é o fluxo de partículas carregadas (electrões) que circulam através de materiais condutores (como cabos ou barras de cobre). Estas partículas adquirem energia numa **fonte** (gerador, módulo fotovoltaico, bateria de acumuladores, etc) e transferem esta energia a uma **carga** (lâmpada, motor, equipamento de comunicações, etc.) e a seguir retornam à fonte para repetir o ciclo.

Se se imaginar um circuito básico como uma bateria de acumuladores conectada a uma lâmpada ter-se-á o indicado na figura 3:



A bateria de acumuladores é uma fonte de electricidade, ou uma força electromotriz (fem). A magnitude desta FEM é o que chamamos tensão e mede-se em Volts.

Estes conceitos podem ser melhor compreendidos se se fizer analogia a um sistema de bombagem de água. Assim, substituir-se-á o fluxo de electrões por água, a fonte de tensão por uma bomba de água e o cabo por uma tubagem.

Ter-se-á então:

MODELO ELÉCTRICO	MODELO HIDRÁULICO
Corrente eléctrica é o fluxo de electrões através de um cabo Mede-se em Amperes.	Caudal de água é o fluxo de água através de uma tubagem. Mede-se em litros/seg.
A fonte de energia eléctrica entrega tensão aos electrões,	A bomba de agua entrega pressão à mesma. A pressão mede-se em kg/cm2 (ou em mm de coluna)

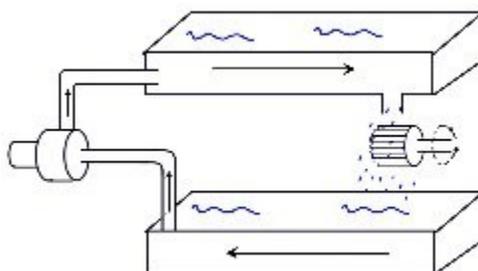
ou seja, capacidade de realizar trabalho. A tensão mede-se em Volts.	de água).
Os electrões perdem sua energia ao passar por uma carga. Aqui é que se realiza o trabalho.	A água perde sua pressão ao passar por uma turbina. Aqui é que se realiza o trabalho.

Ligação em série

Se os elementos de um circuito se conectarem **em série**, isso quer dizer que todo o fluxo (de electrões ou de água) deve passar por cada um dos seus elementos.

Exemplo: No caso da bombagem de água, se se quiser elevá-la a uma altura de 20 m para logo a seguir fazê-la passar por uma pequena turbina deveríamos conectar a bomba e a turbina em série, como mostra a fig. 5. Todo o caudal que passa pela bomba também passará pela turbina e pelas tubagens.

Figura 5

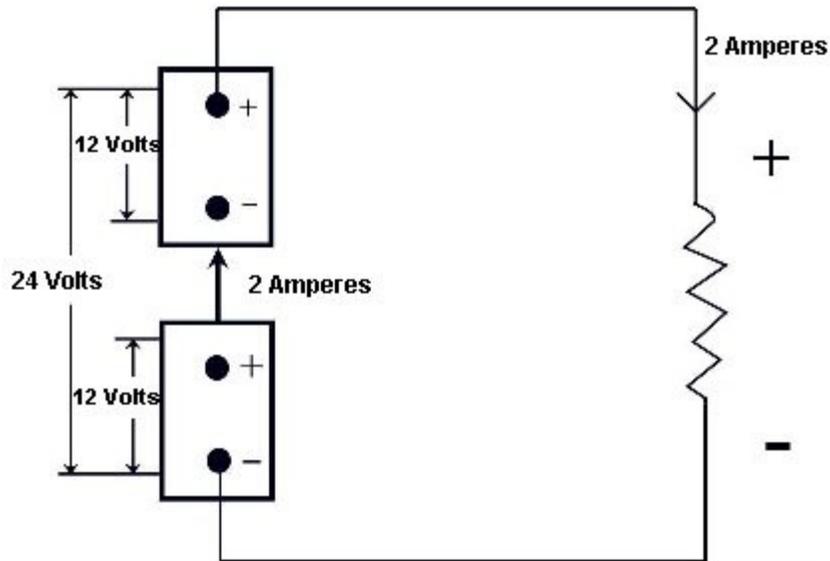


Portanto, o fluxo é constante em qualquer ponto do circuito. Se se quisesse elevar o mesmo caudal ao dobro da altura (40 m) deveriam conectar-se duas das bombas mencionadas em série.

Isto equivale a dizer que **numa ligação em série as pressões somam-se**.

Recordando a analogia eléctrica, o equivalente de **pressão é tensão**. Portanto se se dispuser de dois módulos fotovoltaicos em que cada um entregasse 12 Volts, 2 Amperes e se pretendesse implementar um sistema de 24 Volts e 2 Amperes dever-se-ia montar um circuito conforme a fig. 6.

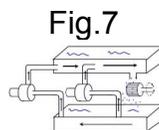
Figura 6



Conclusão: Quando se ligam módulos em série, a tensão resultante é a soma das tensões de cada um deles e a corrente resultante coincide com a menor das correntes entregues pelos módulos.

Ligação em paralelo

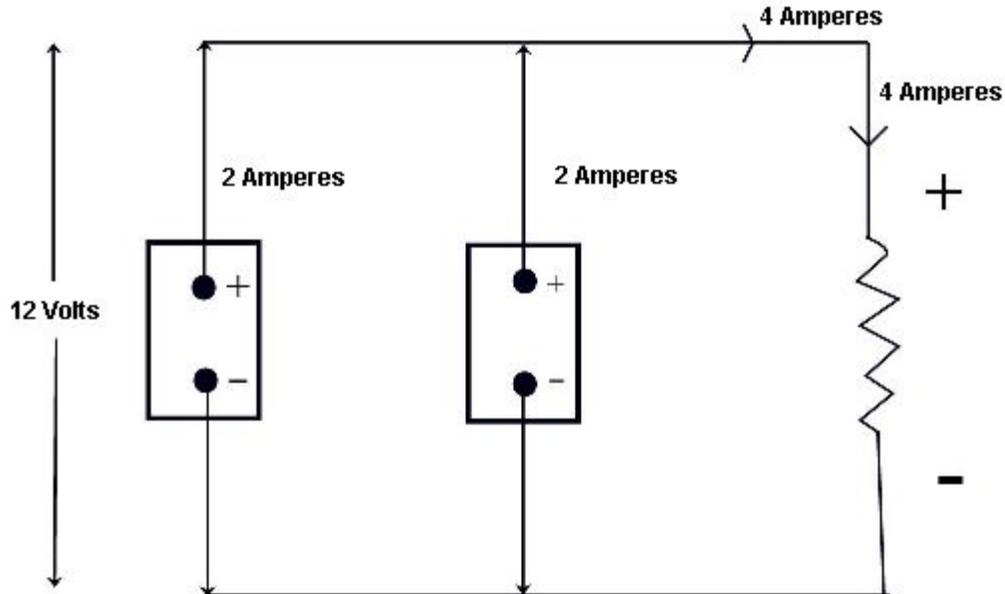
Se a necessidade fôsse de elevar a 20 m de altura o dobro do caudal mencionado anteriormente deveriam conectar-se duas bombas, conforme mostra a figura 7. Esta é uma ligação em paralelo.



Cada bomba elevará um caudal semelhante, passando pela turbina a soma de ambos. Não há qualquer diferença de pressão entre a água bombeada pela primeira e pela segunda bomba e, portanto, toda a água cairá da mesma altura contribuindo com igual pressão.

No caso eléctrico, se se necessitar fornecer à carga 12 volts, 4 amperes, o circuito será o da fig.8.

Fig.8



Conclusão : Quando se ligam módulos em paralelo, a corrente resultante é a soma das correntes de cada um deles e a tensão resultante coincide com a que é entregue por cada módulo.

Potencia

É o produto da tensão pela intensidade de corrente.

$$P=V \times I$$

Em que:

P é a potencia, medida em Watts

V é a tensão aplicada, medida em Volts

I é a corrente que circula, medida em Amperes

Se se analizarem os casos vistos na ligação em série e na ligação em paralelo verificar-se-á que ambos operam com valores de potencia idênticos:

$$24 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 48 \text{ W (ex. série)} \quad 12 \text{ V} \times 4 \text{ A} = 48 \text{ W (ex. paralelo)}$$

Uma mesma potencia eléctrica poderá estar na forma de alta tensão e baixa corrente ou baixa tensão e alta corrente. Cada aplicação determinará a melhor escolha.

Perdas de potencia

Ao circular água por uma tubagem produzem-se perdas de carga por fricção e turbulencia. Ou seja, a tubagem oferece uma certa resistênciã à passagem do fluxo de água. Da mesma forma, os condutores eléctricos oferecem uma certa resistênciã à passagem da corrente de electrões e isto traduz-se numa perda de

potência, o que deve ser levado em conta ao conceber um sistema. Estas perdas de potência transformam-se em calor.

A resistência de um condutor eléctrico é uma propriedade que depende das características intrínsecas do material do condutor e da sua geometria. Dizendo o mesmo por outras palavras, a resistência de um condutor varia em relação directa com a sua resistividade e o seu comprimento e em relação inversa com a sua secção.

Assim, $R = \rho \times (l / s)$

em que:

R = resistência, em Ohms (ω);

ρ = resistência específica ou resistividade, em $\omega\text{mm}^2 \times \text{metro}$

Exemplo do Cobre: $\rho = 0,017 \omega\text{mm}^2 \text{m}$

s = secção do condutor, em mm^2 ;

l = comprimento, em m

Verifica-se que: $V = R \times I$

em que:

"V" é a tensão do sistema, em Volts

"I" é a corrente que se transmite, em Amperes

"R" é a resistência do elemento condutor, em Ohms

Esta expressão constitui a Lei de Ohm e indica que a tensão aplicada é proporcional à resistência e à corrente que circula pelo circuito.

Assim,

A perda de potência será proporcional à resistência do condutor e ao quadrado da corrente que circula pelo mesmo. $P = R \times I^2$

porque $P = V \times I$

e $V = R \times I$

Nos sistemas fotovoltaicos que trabalham a tensões baixas interessa saber que queda de tensão ocorrerá quando a corrente requerida percorrer um condutor de comprimento e secção determinados.

No capítulo 7 dão-se alguns valores de secções de condutor adequados para determinadas correntes e distancias.

Quantidade de energia

Se se tiver que manter acesa durante 2 horas uma lâmpada de 60 Watts, a energia consumida será igual a:

$$E1 = 60 \text{ Watt} \times 2 \text{ h} = 120 \text{ Watt hora}$$

Se, além disso, se quiser alimentar com a mesma fonte um televisor que consome 50 Watts e que funcione durante 3 horas, o consumo de energia do televisor será:

$$E2 = 50 \text{ Watt} \times 3 \text{ h} = 150 \text{ Watt hora}$$

Se E1 e E2 forem os únicos consumos de energia do dia, a procura total de energia diária será:

$$E_{\text{tot}} = 270 \text{ Watts hora por dia}$$

É importante a familiarização com este conceito de procura diária de energia uma vez que, como se verá mais adiante, será utilizado no dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos.



[↑ Topo da página](#)

Pg. revista em 03/Mai/01

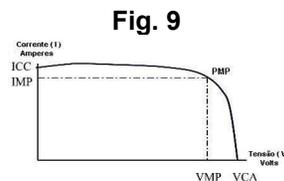
IV- Curvas características das células fotovoltaicas

Curva de corrente x tensão (curva I-V)

A representação típica da característica de saída de um dispositivo fotovoltaico (célula, módulo, sistema) denomina-se curva corrente tensão.

A corrente de saída mantém-se praticamente constante dentro da amplitude de tensão de funcionamento e, portanto, o dispositivo pode ser considerado uma fonte de corrente constante neste âmbito.

A corrente e a tensão em que opera o dispositivo fotovoltaico são determinadas pela radiação solar incidente, pela temperatura ambiente, e pelas características da carga conectadas ao mesmo.



Os valores transcendentais desta curva são:

- **Corrente de curto-circuito (I_{cc}):** Máxima corrente que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a tensão nula e consequentemente a potencia nula.
- **Tensão de circuito aberto (V_{ca}):** Máxima tensão que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a circulação de corrente nula e consequentemente a potencia nula.

- **Potencia Pico (Pmp):** É o valor máximo de potencia que pode entregar o dispositivo. Corresponde ao ponto da curva no qual o produto $V \times I$ é máximo.
- **Corrente a máxima potencia (Imp):** corrente que entrega o dispositivo a potencia máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como corrente nominal do mesmo.
- **Tensão a máxima potencia (Vmp):** tensão que entrega o dispositivo a potencia máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como tensão nominal do mesmo.

Efeito de factores ambientais sobre a característica de saída do dispositivo.

Efeito da intensidade de radiação solar

O resultado de uma mudança na intensidade de radiação é uma variação na corrente de saída para qualquer valor de tensão

A corrente varia com a radiação de forma directamente proporcional. A tensão mantém-se praticamente constante.

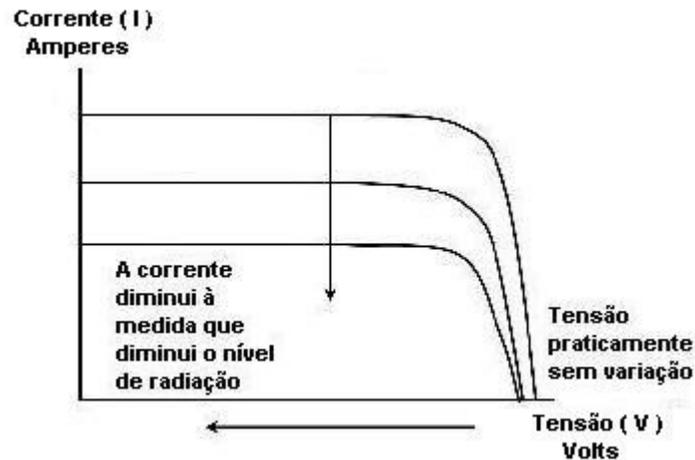


Fig.10

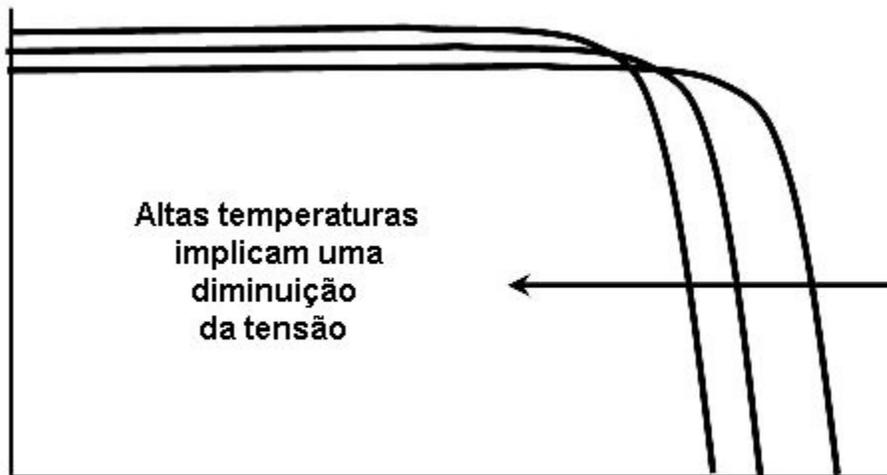
Efeito da temperatura

O principal efeito provocado pelo aumento da temperatura do módulo é uma redução da tensão de forma directamente proporcional. Existe um efeito secundário dado por um pequeno incremento da corrente para valores baixos de tensão.

Tudo isto está indicado na **Fig. 11**

É por isso que para locais com temperaturas ambientes muito elevadas são adequados módulos que possuam maior quantidade de células em série a fim de que as mesmas tenham suficiente tensão de saída para carregar baterias.

Fig.11



Combinações de células e curvas resultantes

A tensão no ponto de máxima potencia de saída para uma célula é de aproximadamente 0,5 Volts em pleno sol.

A corrente que entrega uma célula é proporcional à superfície da mesma e à intensidade da luz. É por isso que para conseguir módulos com correntes de saída menores utilizam-se em sua fabricação terços, quartos, meios, etc de células.

Um módulo fotovoltaico é um conjunto de células conectadas em série (somam-se suas tensões) que formam uma unidade com suficiente tensão para poder carregar uma bateria de 12 volts de tensão nominal (Esta bateria necessita entre 14 e 15 Volts para poder carregar-se plenamente). Para conseguir esta tensão necessitam-se entre 30 e 36 células de silício Monocristalino conectadas em série.

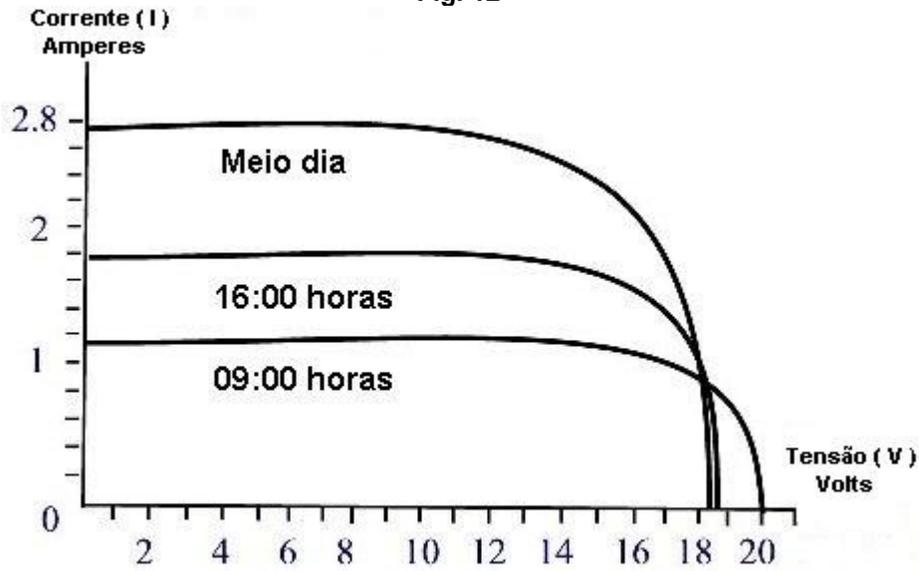
Interação do dispositivo fotovoltaico com a carga

A curva I-V corrigida para as condições ambientais reinantes, é só uma parte da informação necessária para saber qual será a característica de saída de um módulo. Outra informação imprescindível é a característica operativa da carga a conectar. É a carga que determina o ponto de funcionamento na curva I-V

Potencia máxima de saída durante o dia

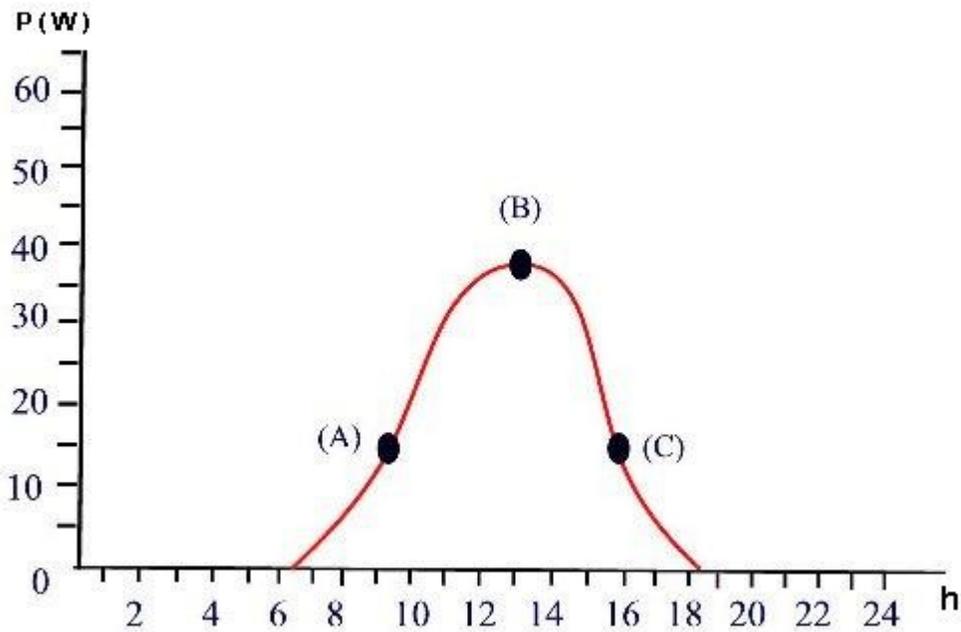
A característica I-V do módulo varia com as condições ambientais (radiação, temperatura). Isto quer dizer que haverá uma família de curvas I-V que nos mostrará as características de saída do módulo durante o dia numa época do ano.

Fig. 12



A curva de potência máxima de um módulo em função da hora do dia tem a forma indicada neste diagrama de carga:

Fig. 13

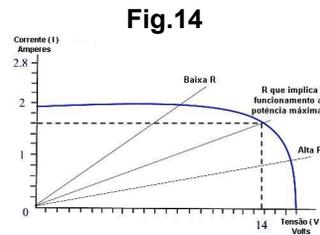


A quantidade de energia que o módulo é capaz de entregar durante o dia é representada pela área compreendida sob a curva da **Fig.13** e mede-se em Watts hora/dia.

Observa-se que não é possível falar de um valor constante de energia entregue pelo módulo em Watts hora uma vez que varia conforme a hora do dia. Será necessário então trabalhar com os valores da quantidade de energia diária entregue. (Watts hora/dia).

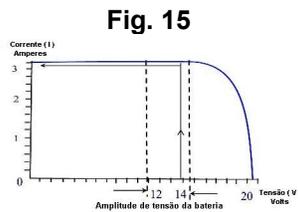
Interacção com uma carga resistiva

No exemplo mais simples, se se conectam os bornes de um módulo aos de uma lâmpada incandescente (que se comporta como uma resistencia eléctrica) o ponto de operação do módulo será o da intersecção da sua curva característica com uma recta que representa gráficamente a expressão $I = V / R$, sendo R a resistencia da carga a conectar.



Interacção com uma bateria

Uma bateria tem uma tensão que depende do seu estado de carga, antiguidade, temperatura, regime de carga e descarga, etc. Esta tensão é imposta a todos os elementos que a ela estão ligados, incluindo o módulo fotovoltaico.

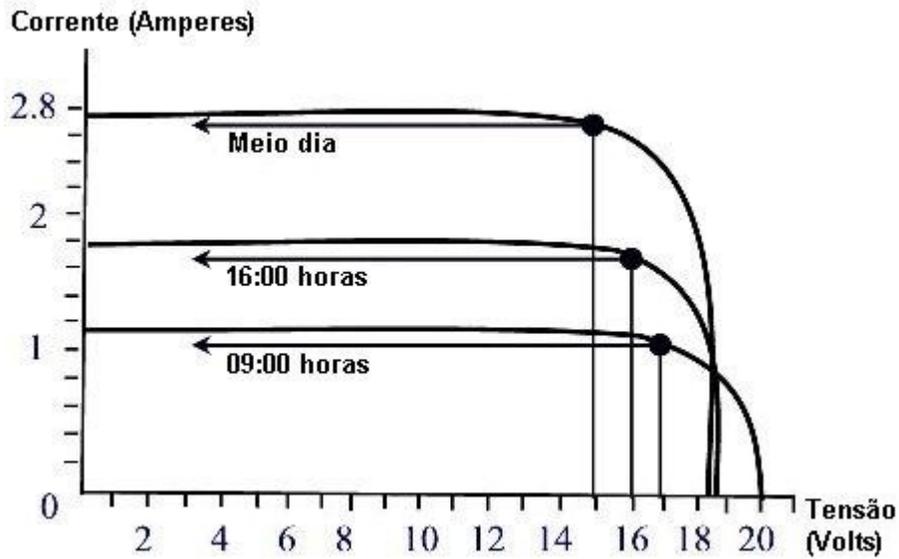


É incorrecto pensar que um módulo com uma tensão máxima de saída de 20 volts elevará uma bateria de 12 volts para 20 volts e a danificará. É a bateria que determina o ponto de funcionamento do módulo.

A bateria varia sua amplitude de tensão entre 12 e 14 volts.

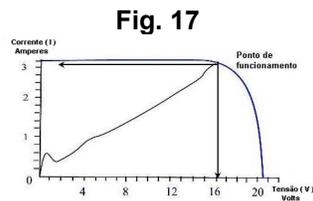
Dado que a saída do módulo fotovoltaico é influenciada pelas variações de radiação e de temperatura ao longo do dia, isto se traduzirá numa corrente variável entrando na bateria.

Fig. 16



Interacção com um motor de corrente contínua

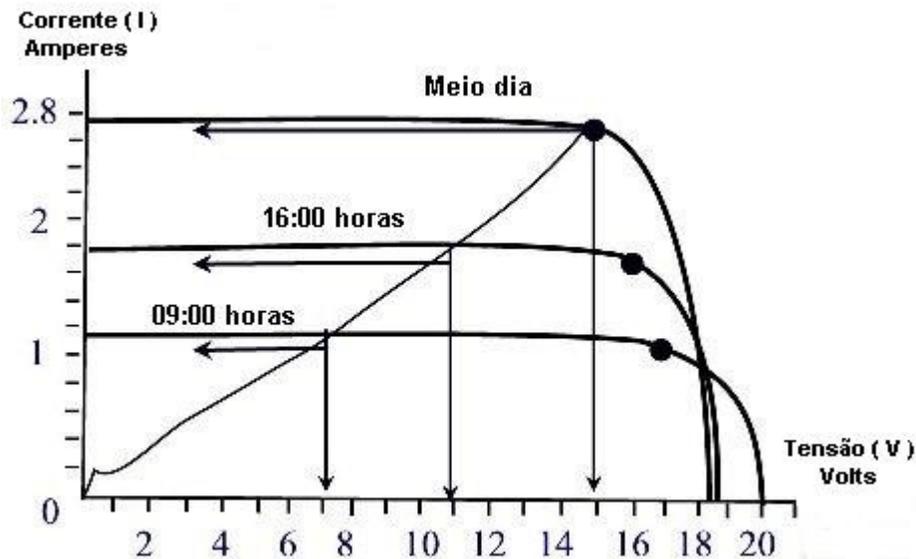
Um motor de corrente contínua tem também uma curva I-V. A intersecção da mesma com a curva I-V do módulo determina o ponto de funcionamento.



Quando se liga um motor directamente ao sistema fotovoltaico, sem bateria nem controles intermediários, diminuem os componentes envolvidos e portanto aumenta a fiabilidade.

Mas, como mostra a **Fig. 18**, não se aproveitará a energia gerada nas primeiras horas da manhã e ao entardecer.

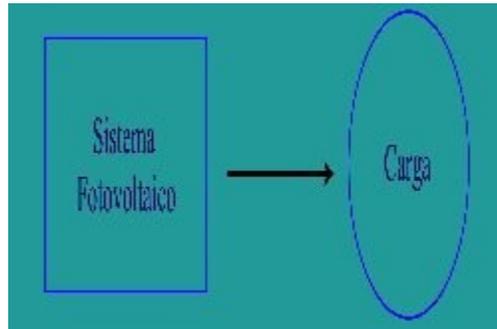
Fig. 18



V- Configuração de sistemas de produção

Directamente ligados a uma carga

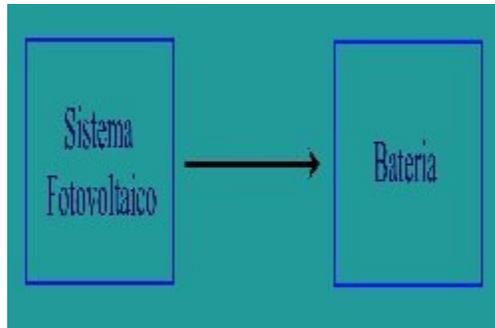
É o sistema mais simples de todos. O gerador fotovoltaico liga-se directamente à carga, geralmente um motor de corrente contínua. Utiliza-se sobretudo na bombagem de água. Por não existirem baterias de acumuladores nem componentes electrónicos melhora a fiabilidade do sistema, mas torna-se difícil manter um desempenho eficiente ao longo do dia.



Sistema módulo-bateria de acumuladores

Pode-se utilizar um módulo fotovoltaico para repor simplesmente a autodescarga de uma bateria que se utilize para o arranque de um motor, por exemplo. Para isso podem utilizar-se os módulos de silício amorfo ou Monocristalino.

Outra importante aplicação em que o sistema fotovoltaico se liga de forma directa à bateria é em sistemas de electrificação rural de baixa potência. Nesses casos utilizam-se um ou dois módulos de silício Monocristalino de 30 células, cada um ligado em paralelo para alcançar a potência desejada.



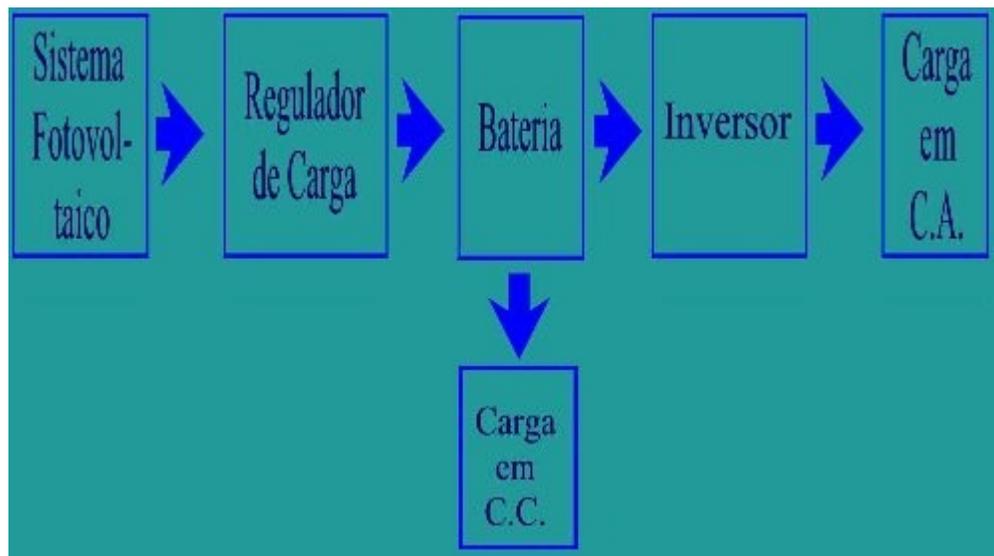
Sistema fotovoltaico, bateria e regulador

É a configuração utilizada com módulos de 33 ou 36 células na qual se liga o gerador fotovoltaico a uma bateria através de um regulador para que esta não se sobrecarregue. As baterias de acumuladores alimentam cargas em corrente contínua.



Bateria, inversor

Quando se necessitar energia em corrente alternada poderá ser incluído um inversor. A potência gerada no sistema fotovoltaico poderá ser transformada integralmente em corrente alternada ou poderão alimentar-se simultaneamente cargas de corrente contínua (C.C.) e de corrente alternada (C.A.)



Reguladores de carga de baterias

Existem diversos tipos de reguladores de carga.

A concepção mais simples é aquela que envolve uma só etapa de controlo. O regulador monitora constantemente a tensão da bateria de acumuladores.

Quando a referida tensão alcança um valor para o qual se considera que a bateria se encontra carregada (aproximadamente 14.1 Volts para uma bateria de chumbo ácido de 12 Volts nominais) o regulador interrompe o processo de carga. Isto pode ser conseguido abrindo o circuito entre os módulos fotovoltaicos e a bateria (controlo tipo serie) ou curtocircuitando os módulos fotovoltaicos (controlo tipo shunt). Quando o consumo faz com que a bateria comece a descarregar-se e portanto a baixar sua tensão, o regulador reconecta o gerador à bateria e recomeça o ciclo.

No caso de reguladores de carga cuja etapa de controlo opera em dois passos, a tensão de

carga a fundo da bateria pode ser algo superior a 14,1 Volts.

O regulador fica definido ao especificar o seu nível de tensão (que coincidirá com o valor de tensão do sistema) e a corrente máxima que deverá manejar.

Para ilustrar com um exemplo simples, suponha-se que se tenha de alimentar uma habitação rural com consumo em 12 Vcc. e para isso se utilizem dois módulos fotovoltaicos.

A corrente máxima destes módulos é $I_{mp} = 2,75 \text{ A}$ e a corrente de curto-circuito $I_{cc} = 3 \text{ A}$.

Quando os módulos estão em paralelo a corrente total máxima que deverá controlar o regulador será

$$I_{\text{total}} = 2 \times 3 \text{ A} = 6 \text{ A}$$

Considera-se a corrente de curto-circuito para contemplar a pior situação.

O regulador a escolher, portanto, deverá estar concebido para trabalhar a uma tensão de 15 Volts (tensão de trabalho dos módulos) e manejar uma corrente de 6 A.

Baterias de acumuladores

A função prioritária das baterias num sistema de geração fotovoltaico é acumular a energia que se produz durante as horas de luminosidade a fim de poder ser utilizada à noite ou durante períodos prolongados de mau tempo.

Outra importante função das baterias é prover uma intensidade de corrente superior àquela que o dispositivo fotovoltaico pode entregar. É o caso de um motor, que no momento do arranque pode exigir uma corrente de 4 a 6 vezes sua corrente nominal durante uns poucos segundos.

Interação entre módulos fotovoltaicos e baterias

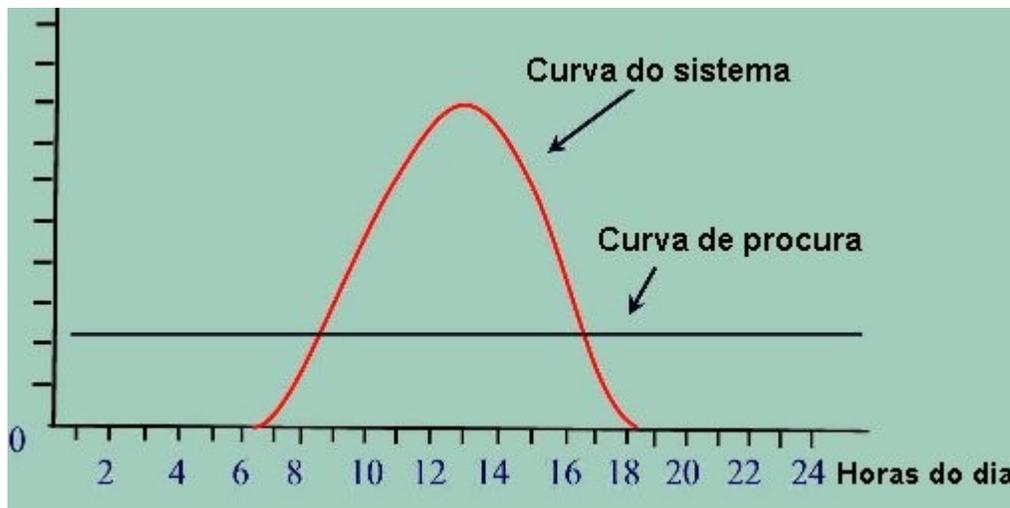
Normalmente o banco de baterias de acumuladores e os módulos fotovoltaicos trabalham em conjunto para alimentar as cargas.

A figura a seguir mostra como se distribui a entrega de energia à carga ao longo do dia.

Durante a noite toda a energia pedida pela carga é fornecida pelo banco de baterias.

Em horas matutinas os módulos começam a gerar, mas se a corrente que fornecerem for menor que aquela que a carga exige, a bateria deverá contribuir. A partir de uma determinada hora da manhã a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos supera a energia média procurada. Os módulos não só atenderão a procura e além disso o excesso será armazenado na bateria que começará a carregar-se e a recuperar-se da sua descarga da noite anterior.

Finalmente durante a tarde, a corrente gerada diminui e qualquer diferença em relação à procura será entregue pela bateria. Durante a noite, a produção é nula e todo o consumo vem da(s) bateria(s) de acumuladores.



Tipos de Baterias de Acumuladores

Baterias de chumbo-ácido de electrólito líquido

As baterias de chumbo-ácido aplicam-se amplamente nos sistemas de geração fotovoltaicos. Dentro da categoria chumbo-ácido, as de chumbo-antimonio, chumbo-selenio e chumbo-cálcio são as mais comuns.

A unidade de construção básica de uma bateria é a célula de 2 Volts.

Dentro da célula, a tensão real da bateria depende do seu estado de carga, se está a carregar, a descarregar ou em circuito aberto.

Em geral, a tensão de uma célula varia entre 1,75 Volts e 2,5 Volts, sendo a média cerca de 2 Volts, tensão que se costuma chamar nominal da célula.

Quando as células de 2 Volts se ligam em série (POSITIVO A NEGATIVO) as tensões das células somam-se, obtendo-se desta maneira baterias de 4, 6, 12 Volts, etc.

Se as baterias estiverem ligadas em paralelo (POSITIVO A POSITIVO E NEGATIVO A NEGATIVO) as tensões não se alteram, mas somar-se-ão suas capacidades de corrente. Só se devem ligar em paralelo baterias de igual tensão e capacidade.

Pode-se fazer uma classificação das baterias com base na sua capacidade de armazenagem de energia (medida em Ah à tensão nominal) e no seu ciclo de vida (número de vezes em que a bateria pode ser descarregada e carregada a fundo antes que se esgote sua vida útil).

A capacidade de armazenagem de energia de uma bateria depende da velocidade de descarga.

A capacidade nominal que a caracteriza corresponde a um tempo de descarga de 10 horas.

Quanto maior for o tempo de descarga, maior será a quantidade de energia que a bateria fornece. Um tempo de descarga típico em sistemas fotovoltaicos é 100 hs. Por exemplo, uma bateria que possua uma capacidade de 80 Ah em 10 hs (capacidade nominal) terá 100 Ah de capacidade em 100 hs.

Dentro das baterias de chumbo-ácido, as denominadas estacionárias de baixo conteúdo de antimonio são uma boa opção em sistemas fotovoltaicos. Elas possuem uns 2500 ciclos de vida quando a profundidade de descarga é de 20 % (ou seja, que a bateria estará com 80 % da sua carga) e uns 1200 ciclos quando a profundidade de descarga é de 50 % (bateria com 50 % de sua carga).

As baterias estacionárias possuem, além disso, uma baixa auto-descarga (3 % mensal aproximadamente contra uns 20 % de uma bateria de chumbo-ácido convencional) e uma manutenção reduzida.

Dentro destas características enquadram-se também as baterias de chumbo-cálcio e chumbo-selenio, que possuem uma baixa resistencia interna, valores desprezíveis de gaseificação e uma baixa autodescarga.

Baterias seladas

-Gelificadas

Estas baterias incorporam um electrólito do tipo gel com consistencia que pode variar desde um estado muito denso ao de consistência similar a uma geleia. Não derramam, podem montar-se em quase todas as posições e não admitem descargas profundas.

-Electrólito absorvido

O electrólito encontra-se absorvido numa fibra de vidro microporoso ou num entrançado de fibra polimérica. Tal como as anteriores não derramam, montam-se em qualquer posição e admitem descargas moderadas.

Tanto estas baterias como as **Gelificadas** não exigem manutenção com acrescentos de água e não desenvolvem gases, evitando o risco de explosão, mas ambas requerem descargas pouco profundas durante sua vida útil.

Níquel-Cádmio

As principais características são :

1. O electrólito é alcalino
2. Admitem descargas profundas de até 90% da capacidade nominal
3. Baixo coeficiente de autodescarga
4. Alto rendimento sob variações extremas de temperatura
5. A tensão nominal por elemento é de 1,2 Volts
6. Alto rendimento de absorção de carga (superior a 80%)

7. Custo muito elevado em comparação com as baterias ácidas

Tal como as baterias de chumbo-ácido, estas podem ser obtidas nas duas versões: standard e seladas. Utiliza-se a mais conveniente conforme a necessidade de manutenção admissível para a aplicação prevista. Dado seu alto custo, não se justifica sua utilização em aplicações rurais.

VI- Dimensionamento de sistemas de geração fotovoltaicos e de bancos de baterias

Dados necessários para dimensionar um sistema

Tensão nominal do sistema.

Refere-se à tensão típica em que operam as cargas a conectar. Dever-se-á, além disso distinguir se a referida tensão é alternada ou contínua.

Potência exigida pela carga

A potência que cada carga exige é um dado essencial. Os equipamentos de comunicações requerem potências importantes quando funcionam em transmissão e isto, muitas vezes, ocorre só durante alguns minutos por dia.

Durante o resto do tempo requerem uma pequena potência de manutenção. Esta diferenciação deve ser levada em conta na concepção do sistema.

Horas de utilização das cargas

Juntamente com a potência requerida pela carga deverão especificar-se as horas diárias de utilização da referida potência. Multiplicando potência por horas de utilização, obter-se-ão os watts hora requeridos pela carga ao fim de um dia.

Localização geográfica do sistema (Latitude , Longitude e a altura relação ao nível do mar do sítio da instalação)

Estes dados são necessários para determinar o ângulo de inclinação adequado para o módulo fotovoltaico e o nível de radiação (médio mensal) do lugar.

Autonomia prevista

Isto refere-se ao número de dias em que se prevê que diminuirá ou não haverá geração e que deverão ser tidos em conta no dimensionamento das baterias de acumuladores. Para sistemas rurais domésticos tomam-se de 3 a 5 dias e para sistemas de comunicações remotos de 7 a 10 dias de autonomia.

Mostra-se a seguir uma folha de calculo para determinar os Watts/hora diários (Wh/dia) de todas as cargas de corrente contínua e alternada que se pretendam alimentar.

a) Cargas em corrente contínua

Aparelho	Horas de uso por dia (A)	Consumo do aparelho em Watts (B)	Total Watts hora/dia (A x B)
----------	--------------------------	----------------------------------	--------------------------------

Lâmpada baixo consumo 7 W	1	8.5	8.5
2 Lâmpadas baixo consumo 9 W	1 a 3	10	60
Lâmpada baixo consumo 9 W	1	10	10
Equipamento de transmissão			
Banda do cidadão			
Transmissão	0.5	12	6
Escuta	3	3	9
		Subtotal 1	93.5

b) Cargas em corrente alternada

Aparelho	Horas de uso por dia (A)	Consumo do aparelho em Watts (B)	Total Watts hora/dia (A x B)
TV a cores 14"	2	60	120
Acrescentar 15% para ter em conta o rendimento do inversor			18
Subtotal 2			138
Procura total de energia em Watts-hora/dia (1 + 2)			231.5

1) Identificar cada carga de corrente contínua, seu consumo em Watts e a quantidade de horas por dia que deve operar. No exemplo consideraram-se lâmpadas de baixo consumo de 7 e 9 W que, com os seus balastros, consomem respectivamente 8,5 e 10 W. Considerou-se também um equipamento de transmissão tipo banda do cidadão onde se identificou seu consumo tanto em transmissão como em escuta.

2) Multiplicar a coluna (A) pela (B) para obter os Watts hora / dia de consumo de cada aparelho (coluna [A xB]).

3) Somar os Watts hora/dia de cada aparelho para obter os Watts hora/dia totais das cargas em corrente contínua (Subtotal 1).

4) Proceder de igual forma com as cargas em corrente alternada com o acréscimo de 15% de energia adicional para ter em conta o rendimento do inversor (Subtotal 2). Para poder escolher o inversor adequado, deve-se-á ter claro quais são os níveis de tensão que se manejarão tanto em termos de corrente alternada como de contínua. Por exemplo, se numa habitação rural se instalar um gerador solar em 12 Vcc. e se deseja alimentar um televisor a cores que funciona em 220 Vca e que consome 60W, o inversor será de 12 Vcc a 220 Vca e manejará no mínimo 60 W. Se existirem outras cargas de corrente alternada deve-se-ão somar todas aquelas que se desejarem alimentar de forma simultânea. O resultado da referida soma, mais uma margem de segurança de aproximadamente 10%, determinará a potência do inversor.

5) Obter a procura total de energia. Subtotal 1 + Subtotal 2.

Cálculo do número de módulos necessários

Método Simplificado

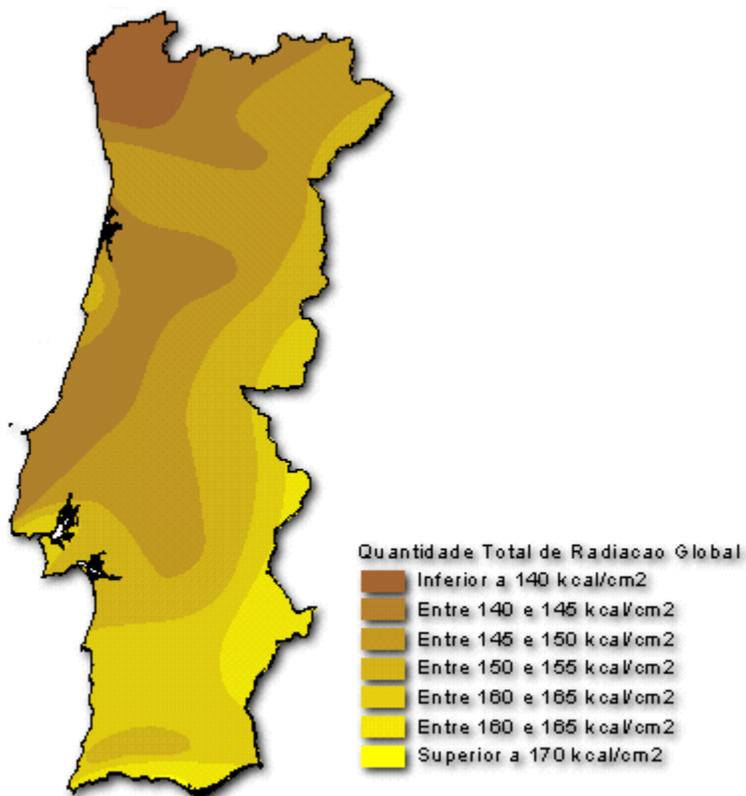
Devem-se conhecer os níveis de radiação solar típicos da região (v. mapa). Como já se viu, a capacidade de produção dos módulos varia com a radiação.

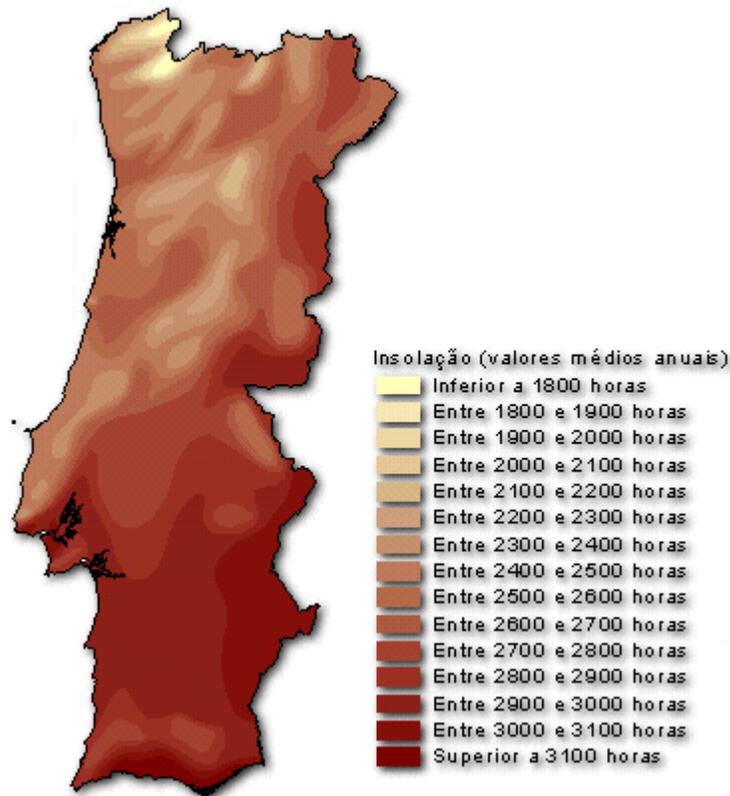
Para realizar um cálculo aproximado da quantidade de módulos necessários para uma instalação pode-se proceder da seguinte forma:

- 1) Calcular com base na folha de dimensionamento da procura total de energia da instalação (Subtotal1 + Subtotal 2)
- 2) Determinar em que zona se realizará a instalação.
- 3) Os valores de radiação devem calcular-se para que no inverno abasteçam adequadamente o consumo. Para isso deverão diminuir-se aos valores médios de radiação a percentagem que se indica na tabela 1.

A FRENTE DOS MÓDULOS DO GERADOR DEVE ESTAR VOLTADA PARA O SUL GEOGRÁFICO (POSIÇÃO DO SOL AO MEIO DIA).

O PLANO DOS MÓDULOS DEVE INSTALAR-SE INCLINADO, FORMANDO COM O PLANO HORIZONTAL UM ÂNGULO DE 45°.





Cálculo do banco de baterias de acumuladores

A capacidade do banco de baterias é obtida com a fórmula:

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

Em que:

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

Dtot: Procura total de energia da instalação em Ah/dia.

Isto se obtém dividindo os Wh/dia totais que surgem da folha de dimensionamento pela tensão do sistema.

Aut: dias de autonomia conforme visto no item Autonomia prevista.

No exemplo adoptado será :

$$\text{Cap. Bat.} = 1,66 \times ((231,5 \text{ Wh/dia} / 12 \text{ Volts}) \times 5 \text{ dias}) = 160 \text{ Ah}$$

Tomar-se-á o valor normalizado imediatamente superior ao que resulte deste cálculo e se armarão as combinações série-paralelo adequadas para cada caso.

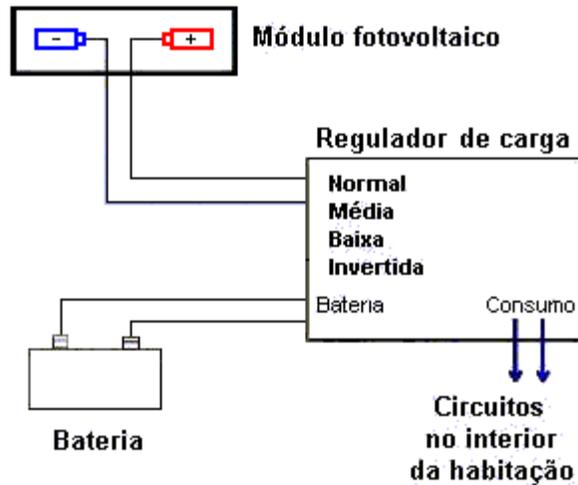
VII- Ligações e dimensionamento de condutores e cabos

Ligações

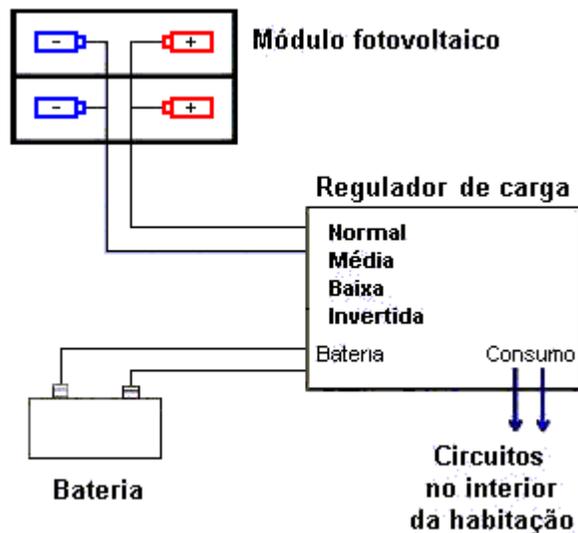
Para assegurar a operação apropriada das cargas deverá efectuar-se a selecção adequada dos condutores e cabos de ligação, tanto daqueles que ligam o gerador solar às baterias como os dos que as interligam com as cargas.

No caso de uma habitação rural, os esquemas de ligação básicos serão os seguintes:

A) Instalação em 12 Vcc com um módulo fotovoltaico de 33 células e regulador de 12 Vcc



B) Instalação em 12 Vcc com módulos fotovoltaicos de 33 células e regulador de 12 Vcc



Para alimentação de equipamentos de comunicações podem ser necessárias tensões superiores a 12 Vcc. As tensões de trabalho típicas são 24, 36 e 48 Vcc. Para realizar o dimensionamento adequado deve-se consultar o Anexo A. Aqui serão indicados apenas algumas ligações básicas para as tensões mencionadas.

a) Instalação em 24 Vcc com quatro módulos fotovoltaicos de 24 Vcc

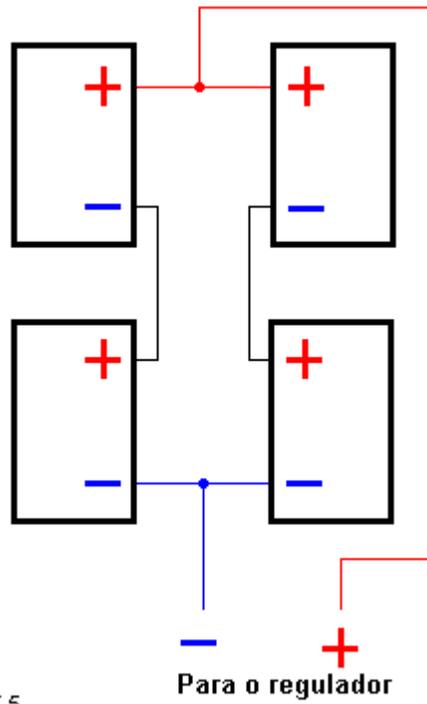
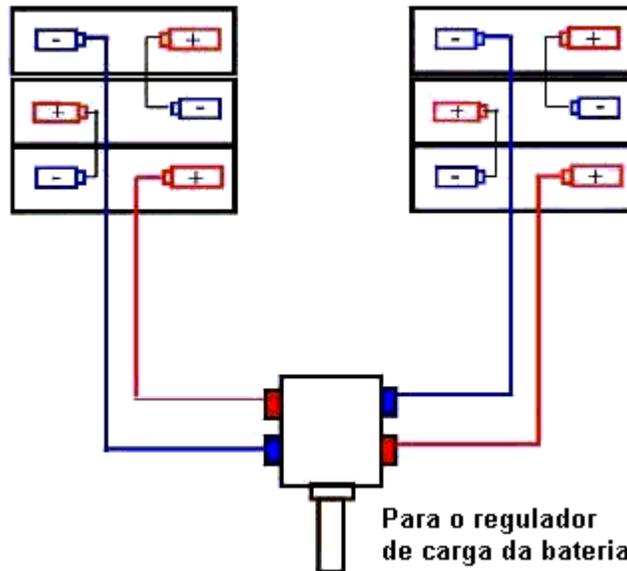
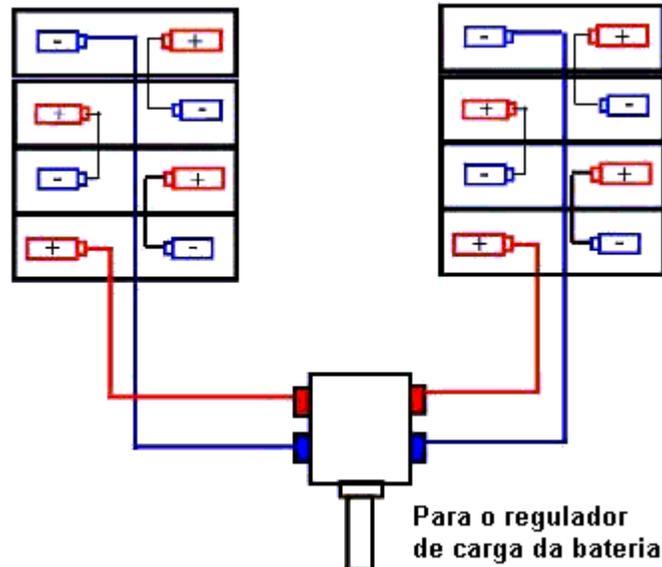


fig.7.5

b) Instalação em 36 Vcc com seis módulos fotovoltaicos de 36 Vcc



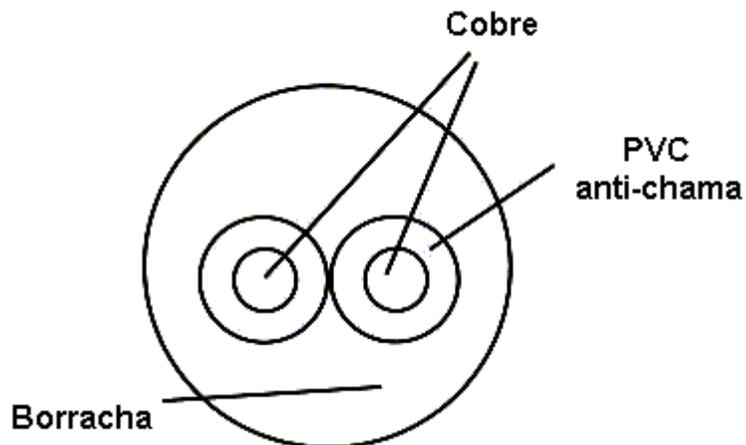
c) Instalação em 48 Vcc com oito módulos fotovoltaicos de 48 Vcc



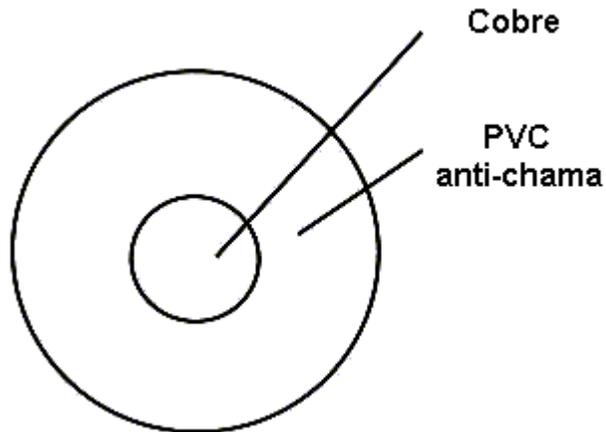
Dimensionamento de condutores e cabos

Os cabos cujo percurso está principalmente em zonas de intempérie deverão ser adequados a essa condição. Nestes casos recomenda-se utilizar o cabo FVV (designação europeia AO5VV-F).

O cabo tipo H07RN-F (norma NP-2357) corresponde à figura seguinte. Trata-se de um cabo flexível, impróprio para a intempérie, a ser instalado num tubo de PVC que lhe servirá de protecção mecânica. O seu nível de isolamento é de 500 V.



Para instalar condutores no interior de uma habitação ou de um edifício utiliza-se cabo de cobre com isolamento de PVC anti-chama conforme a norma NP-2356. Este cabo, inadequado para instalações ao ar livre, deve ser montado dentro de tubos PVC com 16, 20 ou 25 mm de diâmetro. O seu nível de isolamento é de 1000 V. O desenho abaixo mostra um corte do mesmo.



A fim de assegurar o funcionamento adequado das cargas (lâmpadas, televisão, equipamentos de transmissão, etc) não deverá haver mais de 5% de queda de tensão tanto entre os módulos e as baterias como entre as baterias e os centros de cargas.

O processo de selecção do cabo fica mais simplificado se se utilizar a tabela abaixo, que indica a secção de cabo adequada a utilizar para uma queda de tensão de 5% em sistemas de 12 V.

Na coluna à esquerda escolhe-se a corrente pretendida. Nessa mesma linha procura-se a distância que o referido troço de cabo percorrerá e lê-se na parte superior da respectiva coluna a secção de cabo correspondente.

Se a instalação for de 24, 36 ou 48 Vcc proceder-se-á da mesma forma, mas nesse caso deverá dividir a secção obtida por 2, 3 ou 4, respectivamente. Se o valor que resultar desta divisão não coincidir com um valor normalizado de secção deverá adoptar a secção imediatamente superior.

Distância máxima, em metros, para uma queda de tensão de 5% em sistemas de 12 Volts

Secção (mm ²) Corrente (A)	35	25	16	10	6	4	2.5	1.5
1	540	389	246	156	93	62	39	22
2	270	194	123	78	46	31	19	11
3	180	130	82	52	31	20	13	7
4	135	97	62	39	23	15	10	5
5	108	78	49	31	18	12	8	4
6	90	65	41	26	15	10	6	3
7	77	55	35	22	13	9	5	2.8
8	67	49	31	19	12	8	4.5	2.5
9	60	43	27	17	10	7	4	2
10	54	39	25	16	9	6	3.5	1.8
12	45	32	20	13	8	5	3	1.5
15	36	26	16	10	6	4	2	1

18	30	22	14	9	5	3	1.8	0.8
21	26	18	12	7	4	3	1.6	0.7
24	22	16	10	6.5	3.5	2.5	1.5	0.5
27	20	14	9	5.5	3	2	1	-
30	18	13	8	5	2.5	1.5	0.8	-

VIII- Instalação e manutenção

Localização e orientação dos módulos

Para a boa instalação é importante seleccionar a melhor localização possível para os módulos fotovoltaicos.

A localização deve reunir duas condições: 1) Estar o mais próximo possível das baterias (a fim de minimizar a secção do cabo); e 2) Ter condições óptimas para a recepção da radiação solar.

Os módulos deverão estar suficientemente afastados de qualquer objecto que projecte sombra sobre eles no período de melhor radiação (habitualmente das 9 às 17 horas) no dia mais curto do ano.

A figura 8.1 ajuda a calcular a distância mínima (em metros) a que um objecto poderá estar dos módulos a fim de que não projecte sombra sobre os mesmos durante o Inverno, três horas antes e três horas depois do meio dia solar.



Com base na latitude do lugar da instalação obtém-se da figura 8.1 o Factor de espaçamento. Assim, a distância mínima a que poderá estar localizado o objecto será:

$$\text{Distância} = \text{Fe} \times (\text{Ho} - \text{Hm})$$

em que:

Fe = Factor de espaçamento obtido da Fig. 8.1

Ho = Altura do objecto

Hm = Altura em relação ao nível do solo em que se encontram instalados os módulos

Os módulos deverão ser orientados de modo a que a sua parte frontal olhe para o Sul geográfico (ou Norte, quando no hemisfério Sul). Quando o Sol alcançar o ponto mais alto da sua trajectória

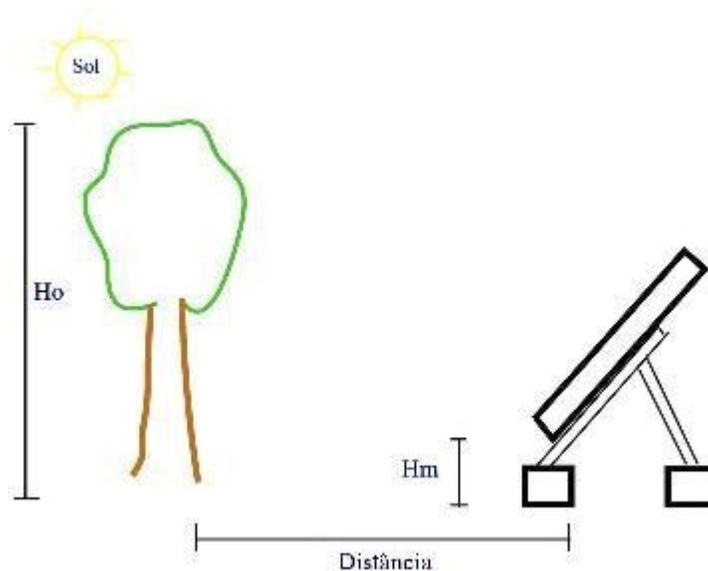
(meio dia) sua posição coincide com o Sul geográfico.

Para conseguir um melhor aproveitamento da radiação solar incidente, os módulos deverão estar inclinados em relação ao plano horizontal num ângulo que variará com a latitude da instalação. A BP Solar recomenda a adopção dos seguintes ângulos de inclinação:

Latitude	Ângulo de inclinação
0 a 4 graus	10 graus
5 a 20 graus	latitude + 5 graus
21 a 45 graus	latitude + 10 graus
46 a 65 graus	latitude + 15 graus
66 a 75 graus	80 graus

Exemplo: como Lisboa está na latitude 39° , o ângulo de inclinação do painel poderá ser de 49° . Pequenas variações de ângulo não afectam significativamente o rendimento da instalação.

No hemisfério Norte as placas ficarão voltadas para o Sul geográfico (que tem uma diferença de 17° em relação ao Sul magnético). No hemisfério Sul as placas ficarão voltadas para o Norte geográfico.



Localização dos demais equipamentos

O regulador de carga das baterias poderá estar localizado na própria estrutura (caso dos geradores solares de apenas um ou dois módulos) ou em algum lugar próximo do banco de baterias (caso dos geradores com maior quantidade de módulos).

As baterias deverão ser instaladas num compartimento separado do resto da habitação e com ventilação adequada, pois das baterias de chumbo-ácido emanam gases explosivos.

Nas instalações rurais é aconselhável ter um quadro de distribuição com uma entrada para o banco de baterias e uma ou duas saídas (com as respectivas protecções) em que se repartirão os consumos das habitações. No referido quadro também poderá haver um sistema indicador do

estado de carga das baterias. Para isso é conveniente colocar o quadro num lugar da habitação de acesso fácil a fim de manter o controlo adequado.

Manutenção dos módulos fotovoltaicos

Uma das grandes vantagens dos sistemas de produção fotovoltaicos é que não necessitam manutenção alguma. É por isso que são os ideais nos sítios em que é preciso autonomia de funcionamento.

A parte frontal dos módulos é constituída por um vidro temperado com 3 a 3,5 mm de espessura, o que os torna resistentes até ao granizo. Além disso, admitem qualquer tipo de variação climática. Eles são auto-limpantes devido à própria inclinação que o módulo deve ter, de modo que a sujeira pode escorrer.

De qualquer forma, nos lugares onde seja possível, será conveniente limpar a parte frontal dos módulos com água misturada com detergente.

Deve-se verificar periodicamente que o ângulo de inclinação obedece ao especificado.

Deve-se confirmar que não haja projecção de sombras de objectos próximos em nenhum sector dos módulos entre as 9 e as 17 horas, pelo menos. Deve-se verificar periodicamente se as ligações eléctricas estão bem ajustadas e sem sinais de oxidação.

Manutenção das baterias

Observar periodicamente o nível de água em cada um dos compartimentos de todas as baterias. Caso o nível esteja baixo, completar com água desmineralizada.

Inspeccionar os terminais a fim de verificar se estão bem ajustados e sem corrosão.

Observar se existe sulfatação, pois isto poderia indicar gás na bateria e portanto uma falha do sistema de regulação.