



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus de Cornélio Procópio



CURSO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA



DISCIPLINA: ENERGIA FOTOVOLTAICA
Profº Marco Antonio Ferreira Finocchio

CORNÉLIO PROCÓPIO – PR / FEVEREIRO 2006

ÍNDICE

1.	Introdução	03
2.	Composição física e fabricação dos dispositivos fotovoltaicos	04
3.	Conceitos elétricos	07
4.	Curvas características das células fotovoltaicas	11
5.	Configuração de sistemas de produção fotovoltaicos	16
6.	Dimensionamento de sistemas de produção fotovoltaicos e de bancos de baterias	20
7.	Conexões e dimensionamento de condutores e cabos	23
8.	Instalação e manutenção	27
9.	Referência bibliografia	29

Este trabalho é uma adaptação e organização das referências bibliográficas.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema de produção eletro-solar é uma fonte de energia que, através da utilização de células fotovoltaicas, converte diretamente a energia luminosa em eletricidade.

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 umidade)
- 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 elétrica, podendo trabalhar de forma independente ou combinada com sistemas de produção elétrica convencional. Suas principais aplicações são:

- Eletrificação de imóveis rurais: luz, TV, rádio, comunicações, bombas de água
- Eletrificação de cercas
- Iluminação exterior
- Sinalização
- Proteção 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 eletrodomésticos utiliza a corrente alternada.

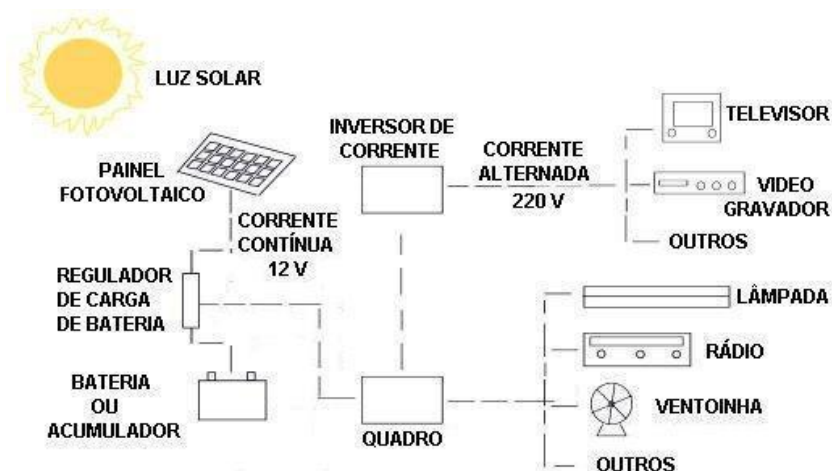


Figura 1

2. COMPOSIÇÃO FÍSICA E FABRICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

Efeito fotovoltaico:

Os módulos são compostos de células solares de silício. Elas são semicondutoras de eletricidade 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 elétrons livres e, portanto é um mau condutor elétrico. Para alterar isto se acrescentam porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. Mediante a dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons 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, déficits de elétrons 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 camadas são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, exatamente na união P-N, gera-se um campo elétrico devido aos elétrons do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P.

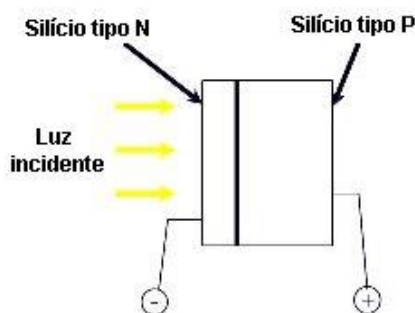


Figura 2

Ao incidir a luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons que a integram chocam-se com os elétrons da estrutura do silício dando-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado na união P-N, os elétrons 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 elétrons (corrente elétrica) na conexão. Enquanto a luz continue a incidir na célula, o fluxo de elétrons 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 elétrons 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 elétron 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 elétron abandona a última célula do módulo e encaminha-se para a bateria outro elétron entra na primeira célula a partir da bateria.

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

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

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 eletricidade é superior a 12%.
- **Silício policristalino:** Estas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de quantidades 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 eletricidade 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 eletricidade 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 elétrico e resistência aos fatores climáticos. Por isso, as células conectadas em série são encapsuladas num plástico elástico (Etilvinilacetato) que faz também o papel de isolante elétrico, 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 elétrico e classificação das células
- Interconexão elétrica 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 elétricas operacionais
- Isolamento elétrico (a 3000 Volt de C.C.)
- Aspectos físicos, defeitos de acabamento, etc
- Resistência ao impacto
- Resistência à tração das conexões
- Resistência à nevoa salina e à umidade 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

3. CONCEITOS ELÉTRICOS

Tensão e corrente:

A eletricidade é o fluxo de partículas carregadas (elétrons) 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 imaginar um circuito básico como uma bateria de acumuladores conectada a uma lâmpada ter-se-á o indicado na figura 3:

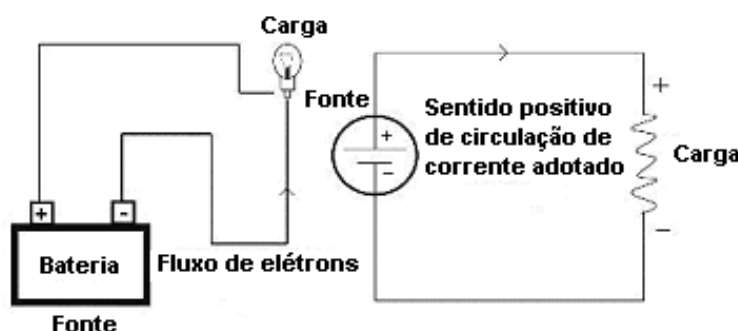


Figura 3

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

Estes conceitos podem ser mais bem compreendidos se fizer analogia a um sistema de bombeamento de água. Assim, substituir-se-á o fluxo de elétrons por água, a fonte de tensão por uma bomba de água e o cabo por uma tubulação.

Ter-se-á então:

MODELO ELÉTRICO	MODELO HIDRÁULICO
Corrente elétrica é o fluxo de elétrons através de um cabo Mede-se em Ampères.	Caudal de água é o fluxo de água através de uma tubulação. Mede-se em litros/seg.
A fonte de energia elétrica entrega tensão aos elétrons, ou seja, capacidade de realizar trabalho. A tensão mede-se em Volts.	A bomba de água entrega pressão à mesma. A pressão mede-se em kg/cm ² (ou em mm de coluna de água).
Os elétrons 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 elétrons ou de água) deve passar por cada um dos seus elementos.

Exemplo: No caso do bombeamento de água, 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 figura 4. Todo o caudal que passa pela bomba também passará pela turbina e pelas tubulação.

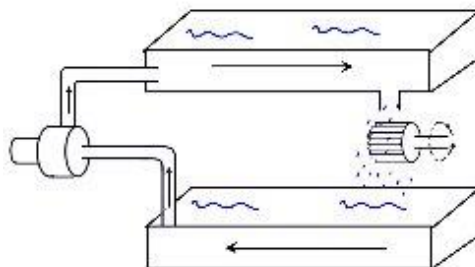


Figura 4

Portanto, o fluxo é constante em qualquer ponto do circuito. 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 elétrica, o equivalente de **pressão** é **tensão**. Portanto se dispuser de dois módulos fotovoltaicos em que cada um entregasse 12 Volts, 2 Ampères e se pretendesse implementar um sistema de 24 Volts e 2 Ampères dever-se-ia montar um circuito conforme a figura 5.

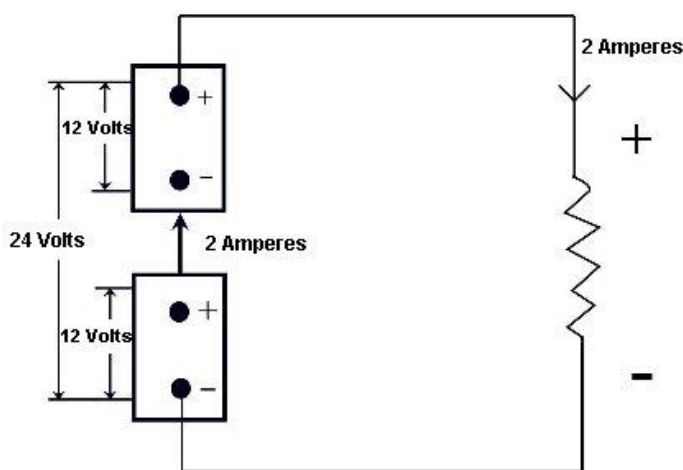


Figura 5

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 fosse de elevar a 20 m de altura o dobro do caudal mencionado anteriormente deveriam conectar-se duas bombas, conforme mostra a figura 6. Esta é uma ligação em paralelo.

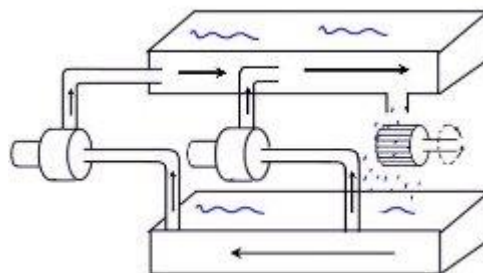


Figura 6

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 elétrico, se necessitar fornecer à carga 12 volts, 4 ampères, o circuito será o da figura 7.

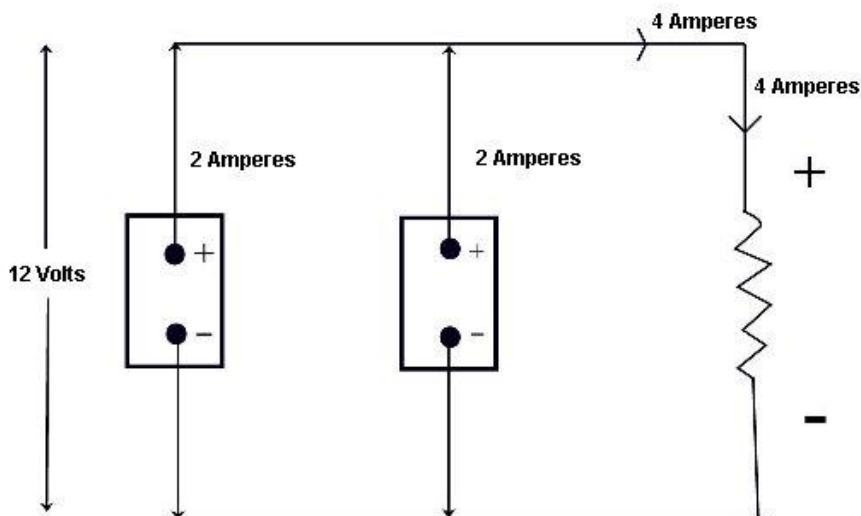


Figura 7

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 Ampères.

Se analisarem 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 elétrica poderá estar na forma de alta tensão e baixa corrente ou baixa tensão e alta corrente. Cada aplicação determinará a melhor escolha.

Perdas de potência

Ao circular água por uma tubulação produzem-se perdas de carga por fricção e turbulência. Ou seja, a tubulação oferece uma certa resistência à passagem do fluxo d'água. Da mesma forma, os condutores elétricos oferecem uma certa resistência à passagem da corrente de elétrons e isto se traduz 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 elétrico 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 direta com a sua resistividade e o seu comprimento e em relação inversa com a sua secção.

Assim, em que:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

R = resistência, em Ohms[Ω]; ρ = resistência específica ou resistividade, em Ωmm² x metro
Exemplo do Cobre: ρ=0,017 Ωmm² m S = secção do condutor, em mm²; l = comprimento, em m
Verifica-se que:

$$V = R.I$$

em que: "V" é a tensão do sistema, em Volts "I" é a corrente que se transmite, em Ampères "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.

$$P = R.I^2 \quad \text{porque } P = V.I \text{ e } V = R.I$$

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 distâncias.

Quantidade de energia

Se tiver que manter acesa durante 2 horas uma lâmpada de 60Watts, 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 50Watts 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.

4. 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.

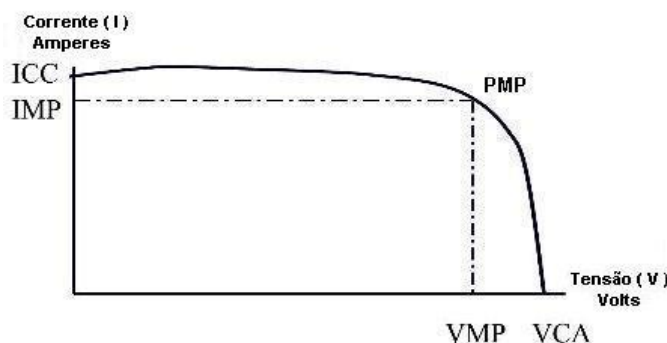


Figura 8

Os valores transcendentais desta curva são:

- **Corrente de curto-circuito (Icc):** Máxima corrente que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a tensão nula e conseqüentemente a potencia nula.
- **Tensão de circuito aberto (Vca):** Máxima tensão que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a circulação de corrente nula e conseqüentemente a potência 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 (I_{mp}):** corrente que entrega o dispositivo a potência máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como corrente nominal do mesmo.
- **Tensão a máxima potencia (V_{mp}):** tensão que entrega o dispositivo a potencia máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como tensão nominal do mesmo.

Efeito de fatores 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 diretamente proporcional. A tensão mantém-se praticamente constante.

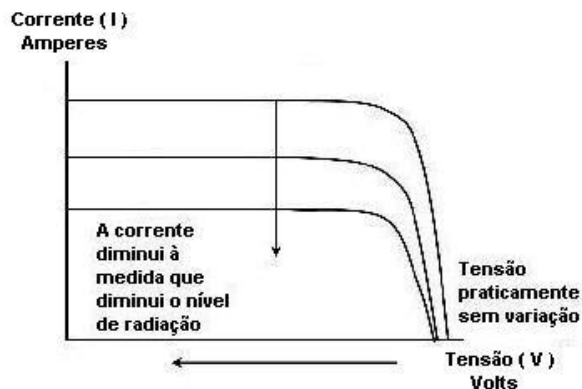


Figura 9

Efeito da temperatura

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

Tudo isto está indicado na Figura 10. 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.

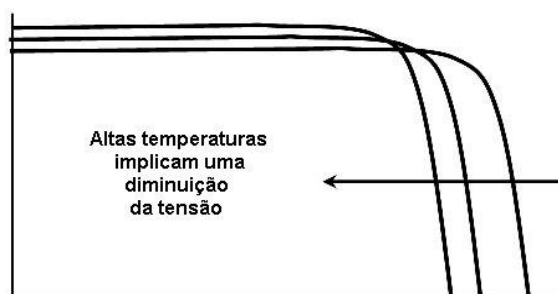


Figura 10

Combinações de células e curvas resultantes

A tensão no ponto de máxima potência 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.

Potência 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.

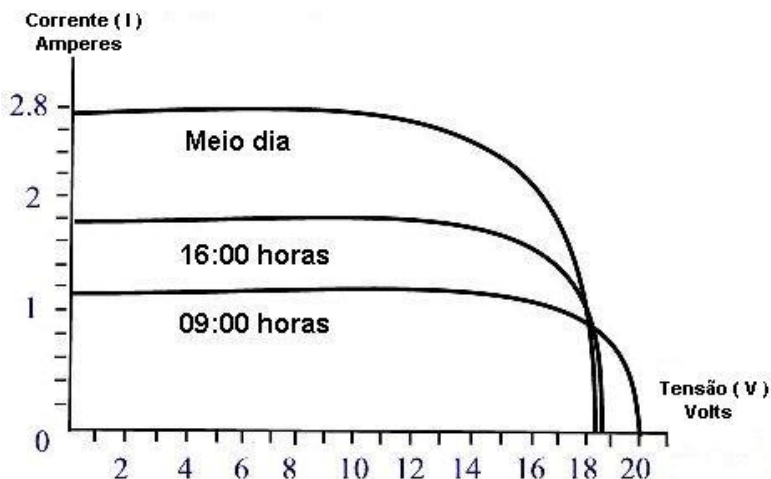


Figura 11

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

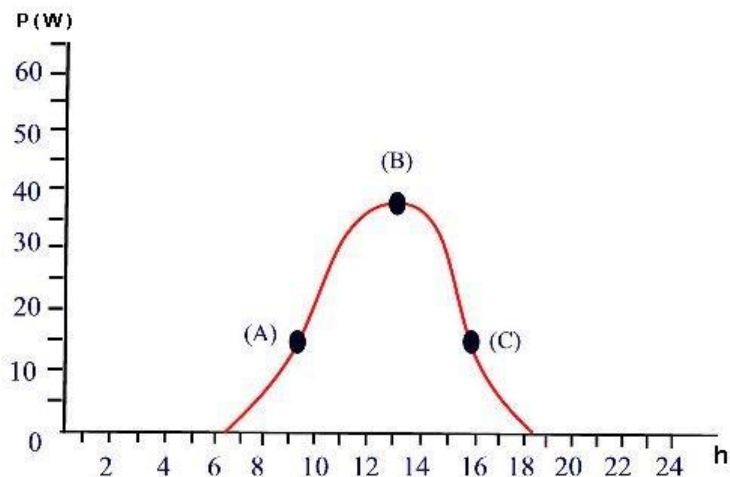


Figura 12

A quantidade de energia que o módulo é capaz de entregar durante o dia é representada pela área compreendida sob a curva da Figura 12 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).

Interação com uma carga resistiva

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

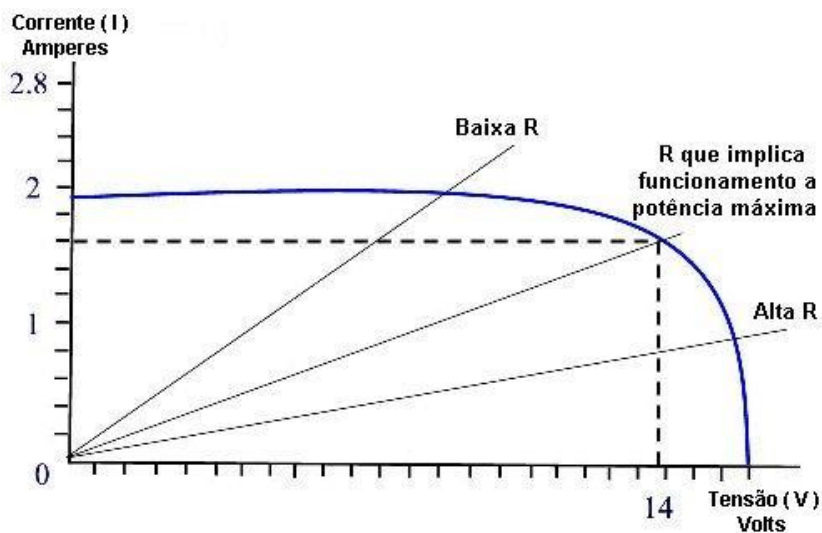


Figura 13

Interação 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.

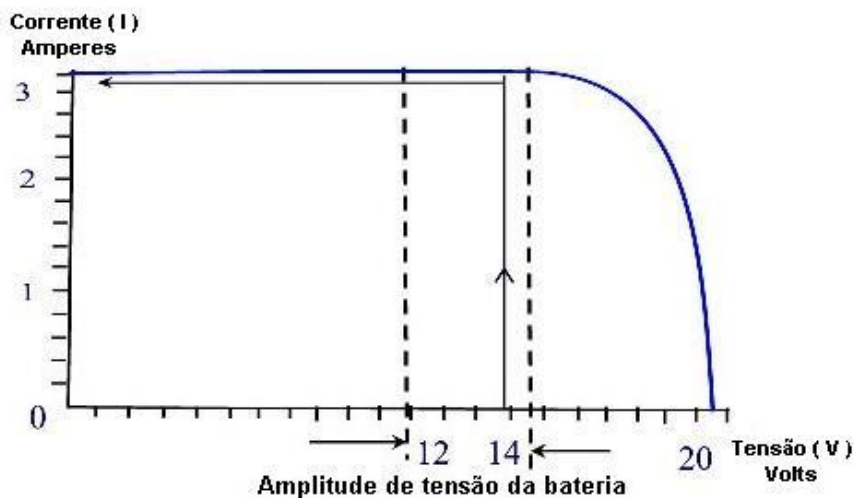


Figura 14

É incorreto 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.

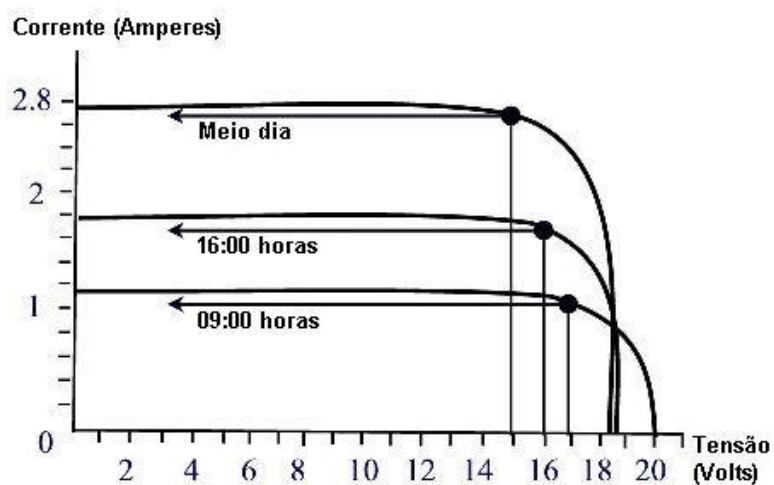


Figura 15

Interação 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.

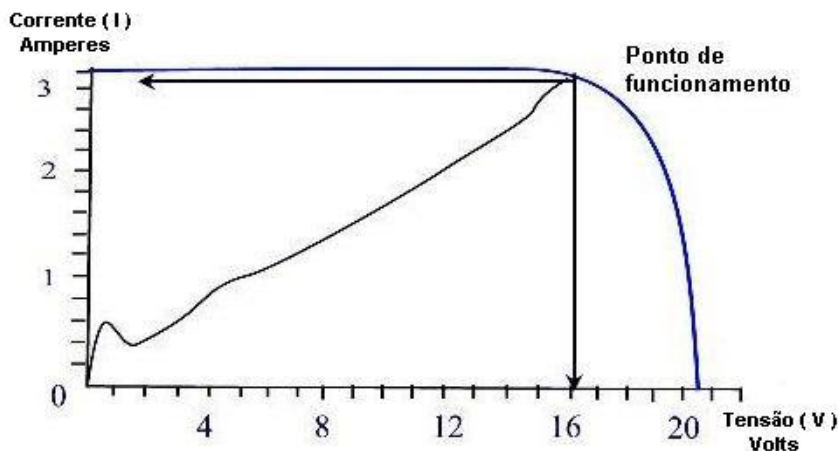


Figura 16

Quando se liga um motor diretamente ao sistema fotovoltaico, sem bateria nem controles intermediários, diminuem os componentes envolvidos e, portanto aumenta a confiabilidade. Mas, como mostra a **Figura 18**, não se aproveitará a energia gerada nas primeiras horas da manhã e ao entardecer.

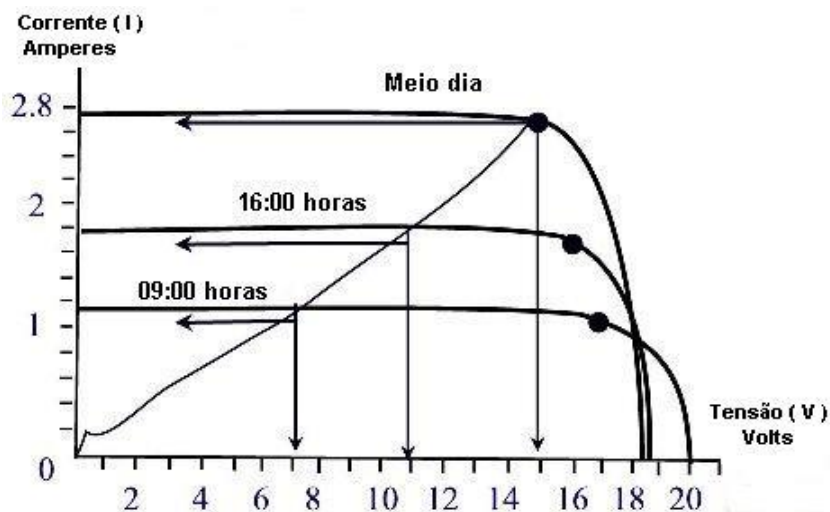


Figura 17

5. CONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Diretamente ligados a uma carga

É o sistema mais simples de todos. O gerador fotovoltaico liga-se diretamente à carga, geralmente um motor de corrente contínua. Utiliza-se, sobretudo no bombeamento de água. Por não existirem baterias de acumuladores nem componentes eletrônicos melhora a confiabilidade do sistema, mas torna-se difícil manter um desempenho eficiente ao longo do dia.



Sistema módulo-bateria de acumuladores

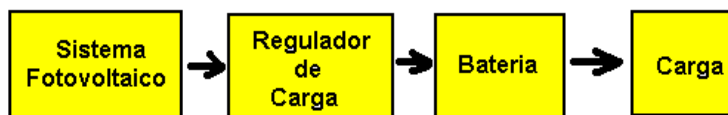
Pode-se utilizar um módulo fotovoltaico para repor simplesmente a autodescarga de uma bateria que se utilize para o arranque de um motor, por exemplo. Para isso podem utilizar-se os módulos de silício amorfo ou Monocristalino.

Outra importante aplicação em que o sistema fotovoltaico se liga de forma direta à bateria é em sistemas de eletrificação 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.



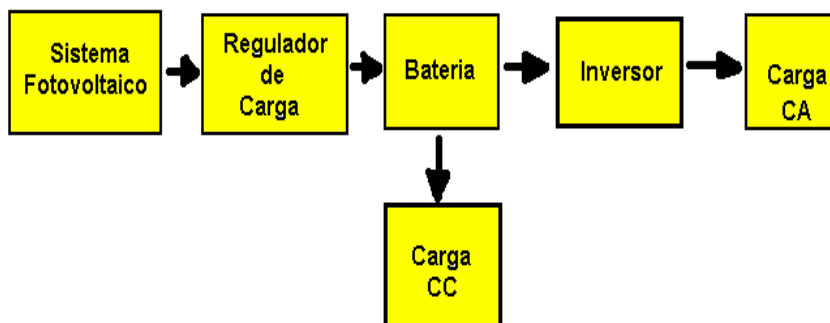
Sistema fotovoltaico, bateria e regulador

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 controle. 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 (controle tipo serie) ou curto-circuitando os módulos fotovoltaicos (controle 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 controle opera em dois passos, a tensão de carga a fundo da bateria pode ser algo superior a 14,1Volts. 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 12Vcc. e para isso se utilize dois módulos fotovoltaicos. A corrente máxima destes módulos é $I_{mp} = 2,75A$ e a corrente de curto-circuito $I_{cc} = 3A$.

Quando os módulos estão em paralelo a corrente total máxima que deverá controlar o regulador será $I_{total} = 2 \times 3A = 6A$. 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 6A.

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

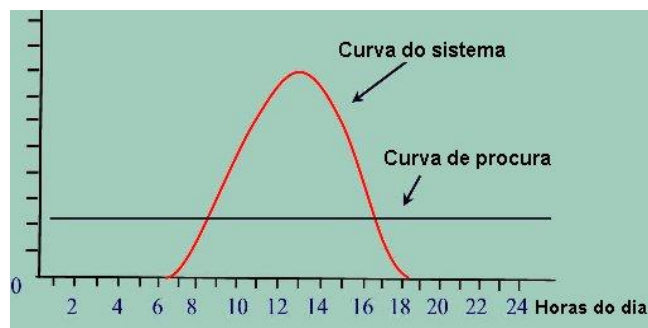
Normalmente o banco de baterias de acumuladores e os módulos fotovoltaicos trabalham em conjunto para alimentar as cargas.

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 eletrólito líquido

As baterias de chumbo-ácido aplicam-se amplamente nos sistemas de geração fotovoltaicos. Dentro da categoria chumbo-ácido, as de chumbo-antimônio, chumbo-selênio 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 1,75Volts e 2,5Volts, sendo a média cerca de 2Volts, tensão que se costuma chamar nominal da célula.

Quando as células de 2Volts se ligam em série (POSITIVO A NEGATIVO) as tensões das células somam-se, obtendo-se desta maneira baterias de 4, 6, 12Volts, 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 as 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 100hs. Por exemplo, uma bateria que possua uma capacidade de 80 Ah em 10hs (capacidade nominal) terá 100 Ah de capacidade em 100hs.

Dentro das baterias de chumbo-ácido, as denominadas estacionárias de baixo conteúdo de antimônio 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 autodescarga (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-selênio, que possuem uma baixa resistência interna, valores desprezíveis de gaseificação e uma baixa autodescarga.

Baterias seladas

-Gelificadas

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

-Eletrólito absorvido

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

Tanto estas baterias como as **Gelificadas** não exigem manutenção com acréscimos 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 eletrólito 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 1,2Volts
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.

6. 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 9W que, com os seus reatores, consomem respectivamente 8,5 e 10W. 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 [AxB]).
- 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 acrescento de 15% de energia adicional para ter em conta o rendimento do inversor (Subtotal 2). Para poder escolher o inversor adequado, dever-se-á ter claro qual são os níveis de tensão que se manejarão tanto em termos de corrente alternada como de continua. Por exemplo, se numa habitação rural se instalar um gerador solar em 12Vcc. e se deseja alimentar um televisor a cores que funciona em 220Vca e que consome 60W, o inversor será de 12Vcc a 220Vca e manejará no mínimo 60W. Se existirem outras cargas de corrente alternada dever-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

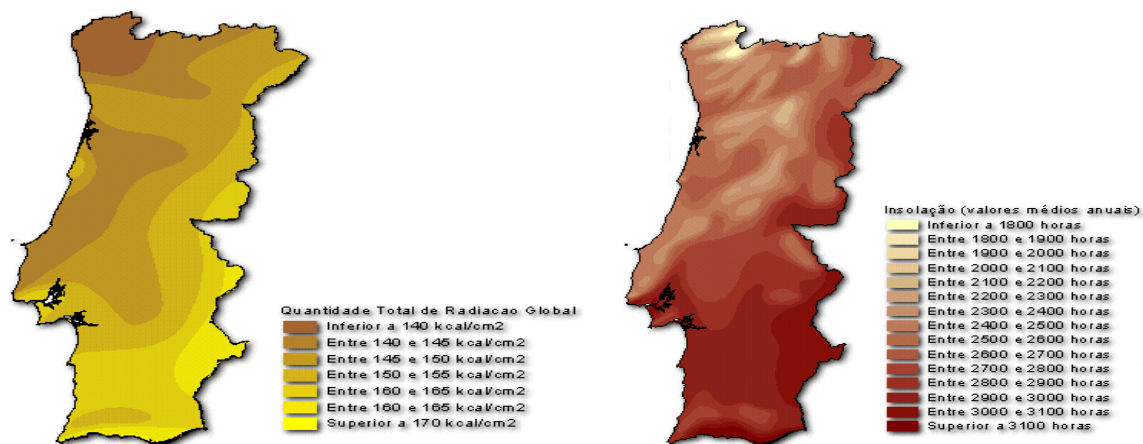
Método Simplificado

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 deverá diminuir-se aos valores médios de radiação a porcentagem 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:

$$Cap = 1,66 * D_{tot} * A_{ut}$$

Em que:

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

D_{tot}: 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.

A_{ut}: dias de autonomia conforme visto no item Autonomia prevista. No exemplo adotado será:

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

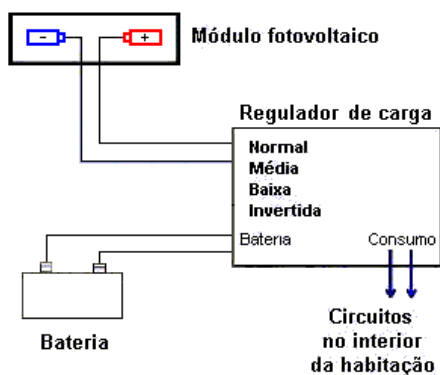
Tomar-se-á o valor normalizado imediatamente superior ao que resulte deste cálculo e se armará as combinações série-paralelo adequadas para cada caso.

7. LIGAÇÕES E DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES E CABOS

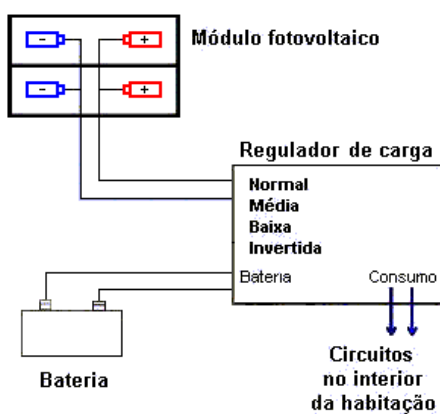
Ligações

Para assegurar a operação apropriada das cargas deverá efetuar-se a seleção 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 12Vcc com um módulo fotovoltaico de 33 células e regulador de 12Vcc



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



Para alimentação de equipamentos de comunicações podem ser necessárias tensões superiores a 12Vcc. As tensões de trabalho típicas são 24, 36 e 48Vcc. 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 24Vcc com quatro módulos fotovoltaicos de 24Vcc

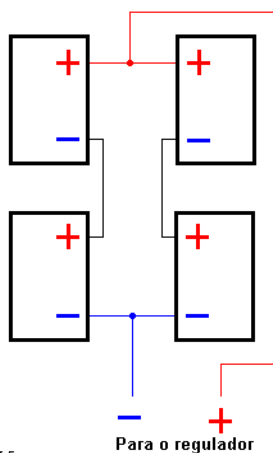
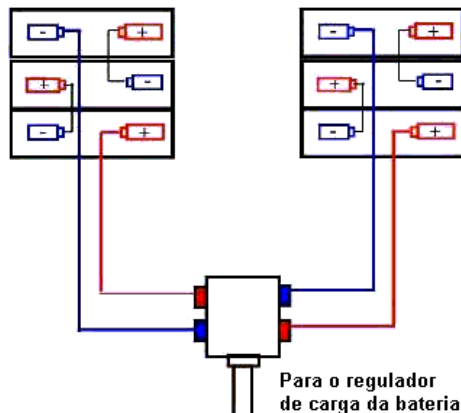
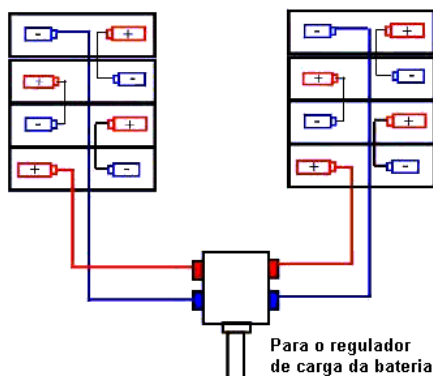


fig.7.5

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



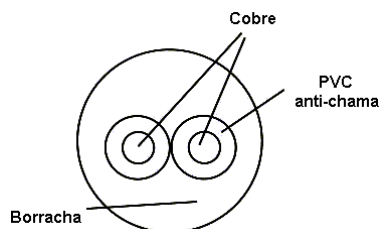
c) Instalação em 48Vcc com oito módulos fotovoltaicos de 48Vcc



Dimensionamento de condutores e cabos

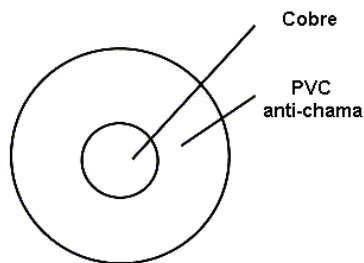
Os cabos cujo percurso está principalmente em zonas de intempérie deverão ser adequados a essa condição. Nestes casos recomenda-se utilizar o cabo FVV (designação europeia AO5VV-F).

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 proteção 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 25mm de diâmetro. O seu nível de isolamento é de 1000V. 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 seleção do cabo fica mais simplificado 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 48Vcc proceder-se-á da mesma forma, mas nesse caso dever-se-á 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 dever-se-á adotar a secção imediatamente superior.

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

Seção (mm ²)	35	25	16	10	6	4	2.5	1.5
Corrente (A)								
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	-

8. INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO

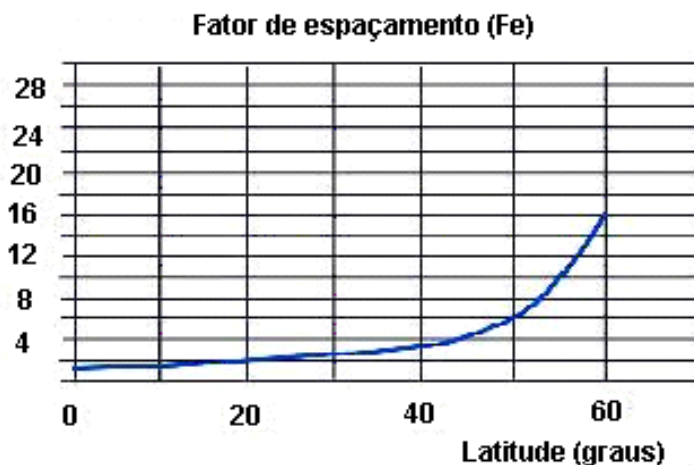
Localização e orientação dos módulos

Para a boa instalação é importante selecionar 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 ótimas para a recepção da radiação solar.

Os módulos deverão estar suficientemente afastados de qualquer objeto que projete 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 objeto poderá estar dos módulos a fim de que não projete 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 Fator de espaçamento. Assim, a distância mínima a que poderá estar localizado o objeto será:

$$Distância = Fe * (H_o - H_m)$$

em que:

Fe = Fator de espaçamento obtido da Fig. 8.1

Ho = Altura do objeto

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

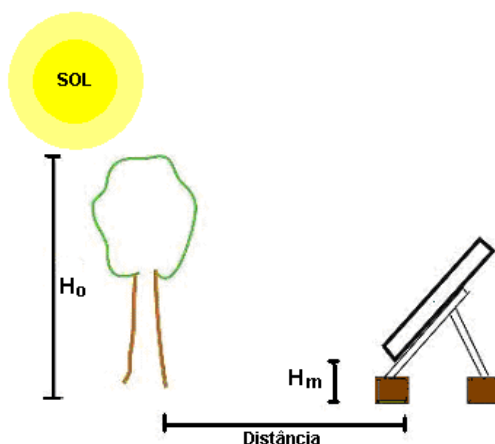
Para conseguir um melhor aproveitamento da radiação solar incidente, os módulos deverão estar inclinados em relação ao plano horizontal num ângulo que variará com a latitude da instalação. A BP Solar recomenda a adoção dos seguintes ângulos de inclinação:

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 afetam 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.

Cornélio Procópio: Latitude 23°10'52"S e Longitude 50°38'48"O



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 proteções) 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 controle 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 projeção de sombras de objetos próximos em nenhum setor dos módulos entre as 9 e as 17 horas, pelo menos. Deve-se verificar periodicamente se as ligações elétricas 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.

Inspecionar 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.

9. REFERÊNCIA BIBLIOGRAFIA

ALDABÓ, Ricardo. *Energia solar*. São Paulo: Artliber, 2002.

FINOCCHIO, Marco Antonio Ferreira. *Conservação de energia*. Apostila Interna do Curso de Tecnologia em Eletrotécnica. Cornélio Procópio: CEFET-PR/CP, 2000.

FINOCCHIO, Marco Antonio Ferreira. *Conservação de energia*. Apostila Interna do Curso de Tecnologia em Automação. Cornélio Procópio: UTFPR, 2005.

HINRICHS, Roger A., KLEINBACH, Merlin. *Energia e meio ambiente*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

REIS, Lineu Bélico dos. *Geração de energia elétrica*. São Paulo: Tec-Art Editora Ltda, 1998.

RÜTHER, Ricardo. *Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica*. Florianópolis: UFSC, Labsolar, 1999.

SIEMENS. *Energia solar fotovoltaica*. Catálogo de Aplicações. São Paulo: Siemens Ltda, 1999.